



M 2014

ANÁLISE TERMO-MECÂNICA DOS PILARES DE UM DESCARREGADOR DE CHEIAS

PEDRO BRUNO DA CUNHA FONSECA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA
À FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO EM
MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL

ANÁLISE TERMO-MECÂNICA DOS PILARES DE UM DESCARREGADOR DE CHEIAS

PEDRO BRUNO DA CUNHA FONSECA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS

Orientador: Professor Doutor Mário Jorge de Seixas Pimentel

JUNHO DE 2014

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2013/2014

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2013/2014 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2014.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

A meus pais

All you need is ignorance and confidence and the success is sure

Mark Twain

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, queria agradecer ao Professor Mário Pimentel pelo desafio que me colocou com a elaboração deste trabalho e pela orientação prestada ao longo destes meses. Todos os ensinamentos teóricos, bem como a familiarização com o *software* DIANA foram essenciais para elaboração desta dissertação, que contribuiu em muito para a minha formação.

Ao meu Professor e amigo Ricardo Rocha, que sempre apostou em mim, tendo sido determinante para a minha entrada no ensino superior.

Tendo sido fundamentais, queria agradecer a todos os meus amigos do secundário e da faculdade, que sempre estiveram presentes nestes últimos 5 anos e que sempre me incentivaram a chegar mais longe.

À minha namorada, Catarina, agradeço muito a paciência, apoio e carinho que sempre demonstrou.

Por último, um agradecimento especial aos meus pais, tia e primo, pelo apoio constante ao longo deste caminho, que contribuiu para a minha formação enquanto futuro Engenheiro, mas acima de tudo enquanto pessoa.

RESUMO

A presente dissertação tem como objetivo a realização de uma análise termo-mecânica aos pilares de um descarregador de cheias, utilizando para o efeito um programa de cálculo que, através do Método dos Elementos Finitos, considere todas as variáveis necessárias à correta determinação das tensões do betão durante a fase construtiva.

O estudo do comportamento termo-mecânico em estruturas de betão muito massivas é necessário para a avaliação do comportamento estrutural durante as primeiras idades. A reação exotérmica inerente à hidratação do cimento condiciona todo o processo construtivo.

No caso da construção de um pilar de descarregador de cheias estes aspetos são ainda mais relevantes dado o elevado teor de cimento ditado pelas exigências de resistência do betão. Muitas vezes é necessário otimizar a pasta de ligante através da utilização de adições que permitam reduzir o calor de hidratação.

Para a concretização deste trabalho foi elaborada uma pesquisa bibliográfica, com o objetivo de adquirir um melhor entendimento do comportamento termo-mecânico do betão durante as primeiras idades, bem como as ferramentas utilizadas para a sua modelação com base em modelos numéricos.

Foi alvo de estudo a Lei de Fourier para a propagação de calor no betão e o acoplamento dos fenómenos de transmissão de calor por convecção e radiação através da Lei de Newton. Nesta dissertação são ainda abordadas as metodologias construtivas mais utilizadas na construção de barragens e em estruturas associadas a estas.

De modo a simular corretamente este problema torna-se necessária a realização de análises termo-mecânicas. Primeiro é executado uma análise térmica não linear que considere a geração de calor e a sua transmissão por condução, convecção e radiação. Posteriormente é elaborada uma análise mecânica viscoelástica, de forma a avaliar as tensões de origem térmica nas primeiras idades.

O *software* DIANA foi a ferramenta utilizada para a concretização destas análises, a partir do qual foram elaborados dois modelos.

Estrategicamente elaborou-se um modelo mais simples, denominado Modelo Base, que fosse representativo do comportamento térmico do betão no pilar de descarregador de cheias. A partir deste modelo foram realizados diferentes estudos paramétricos, que permitiram concluir que variáveis como a temperatura inicial do betão, a radiação solar e o ritmo de betonagem condicionam de forma importante o campo de temperaturas no betão.

Posteriormente elaborou-se o Modelo do Pilar de Descarregador de Cheias, sendo que este teve como objetivo representar de forma mais pormenorizada o caso de estudo. Neste modelo foram utilizadas as conclusões obtidas no estudo paramétrico anterior. As diferentes análises termo-mecânicas realizadas no âmbito do caso de estudo permitiram determinar que há uma grande probabilidade de aparecimento de fendas no betão durante a fase construtiva.

PALAVRAS-CHAVE: Betão em massa, Método dos elementos finitos, Barragens, Calor de hidratação, Comportamento do betão nas primeiras idades, Fendilhação

ABSTRACT

This master thesis aims to perform a thermo-mechanical analysis of a spillway pier, using a computer program based on the Finite Element Method, which considers all the necessary variables for the proper determination of the concrete stresses during the construction phase.

The study of the thermo-mechanical problem in mass concrete structures is necessary to the structural behaviour at early ages. The intrinsic exothermic reaction of the cement hydration affects the entire construction process.

In the construction of a spillway pier these aspects are even more important, given the high cement content imposed by demands of concrete strength. It is often necessary to consider the need to modify the binder paste through the use of additions, which allows reducing the hydration heat.

To fulfil this work, a literature research was made to acquire a better understanding of the concrete thermo-mechanical behaviour at early ages, as well as the tools used for its modelling through the use of numerical models.

The Fourier's Law to the concrete's heat propagation and the engagement between convection and radiation through the Newton's Law were also studied, as well as the construction methods most commonly used in dams and associated structures.

For the purpose of properly considering this problem it is necessary to perform nonlinear analyses. Firstly it is executed a nonlinear analysis which considers the cement heat generation and its transmission through conduction, convection and radiation. Afterwards it is prepared a viscoelastic mechanical analysis, in order to determine the concrete thermal stresses at early ages.

DIANA software was the tool used in the elaboration of these analyses, from which two models were developed.

Strategically, it was prepared a simpler model, called Base Model, which is representative of the concrete thermal behaviour in a spillway pier. Based on this model many parametric studies were developed, which allowed to verify what variables, such as the initial concrete temperature, the solar radiation and the concreting rhythm may actually constrain the thermal field of concrete.

Afterwards it was prepared the Spillway Pier Model, which was meant to represent the case study with more detail. The conclusions obtained in the previous parametric studies were used in this model. The various thermo-mechanical analyses undertaken in this case study allowed concluding that there is a high probability of cracks to appear in concrete during the construction phase.

KEYWORDS: Mass concrete, Finite element method, Dams, Hydration heat, Concrete behaviour at early ages, Cracking

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO GERAL E OBJETIVOS	1
1.2. ORGANIZAÇÃO DOS CAPÍTULOS	2

2. PROBLEMA TERMO-MECÂNICO EM ESTRUTURAS DE BETÃO	3
2.1. PROBLEMA TÉRMICO	3
2.1.1. INTRODUÇÃO	3
2.1.2. CONSIDERAÇÕES GERAIS	3
2.1.3. CONDUÇÃO DE CALOR	4
2.1.3.1. Transmissão de calor por condução	4
2.1.3.2. Propriedades térmicas	4
2.1.3.3. Equação de condução de calor	5
2.1.4. CALOR DE HIDRATAÇÃO	8
2.1.4.1. Composição e Hidratação do cimento	8
2.1.4.2. Calorimetria adiabática	8
2.1.4.3. Influência de aditivos no calor de hidratação	9
2.1.5. CONDIÇÕES FRONTEIRA	9
2.1.5.1. Transmissão de calor por convecção	9
2.1.5.2. Transmissão de calor por radiação	10
2.1.5.3. Equação convecção-radiação	11
2.1.5.4. Coeficiente equivalente de transmissão de calor	12
2.1.5.5. Radiação solar	12
2.1.6. TRATAMENTO DO PROBLEMA TÉRMICO PELO MEF	14
2.2. PROBLEMA MECÂNICO	15
2.2.1. INTRODUÇÃO	15
2.2.2. GRAU DE HIDRATAÇÃO	16

2.2.2.1. Conceito e definição	16
2.2.2.2. Propriedades mecânicas do betão em função do grau de hidratação	16
2.2.3. MATURIDADE E IDADE EQUIVALENTE	17
2.2.3.1. Conceito e definição	17
2.2.3.2. Propriedades mecânicas do betão em função da idade equivalente.....	18
2.2.4. FLUÊNCIA	20
2.2.4.1. Fluência nas primeiras idades do betão.....	20
2.2.4.2. Lei da Dupla Potência	20
2.2.5. RETRAÇÃO	21
2.2.6. OUTRAS PROPRIEDADES MECÂNICAS.....	22
2.2.6.1. Coeficiente de Poisson	22
2.2.6.2. Coeficiente de dilatação térmica	22

3. METODOLOGIAS DE CONSTRUÇÃO DE ESTRUTURAS COM GRANDES MASSAS DE BETÃO

23

3.1. INTRODUÇÃO

23

3.2. MÉTODOS CONSTRUTIVOS.....

23

3.2.1. RITMOS DE BETONAGEM

23

3.2.2. TIPOS DE COFRAGEM.....

24

3.2.3. ESPAÇAMENTO ENTRE JUNTAS.....

25

3.2.4. CONTROLO DA TEMPERATURA DO BETÃO.....

25

3.2.4.1 Arrefecimento dos constituintes de betão

26

3.2.4.2 Arrefecimento artificial do betão

26

3.3 ESPECIFICAÇÕES DE PROJETO

28

3.3.1. TEMPERATURA MÁXIMA DO BETÃO.....

29

3.3.2. TEMPERATURA DIFERENCIAL MÁXIMA.....

29

4. ANÁLISES TÉRMICAS - ESTUDO PARAMÉTRICO

31

4.1. INTRODUÇÃO

31

4.2. TABELA DE ANÁLISES TÉRMICAS

31

4.3. MODELO BASE

32

4.3.1. DISCRETIZAÇÃO DO MODELO.....

33

4.3.1.1. Caracterização da geometria

33

4.3.1.2. Condições fronteira	33
4.3.1.3. Propriedades dos materiais	34
4.3.1.4. Malha.....	34
4.3.1.5. Análise Base	35
4.4. ESTUDOS PARAMÉTRICOS	37
4.4.1. INFLUÊNCIA DO PROCESSO CONSTRUTIVO	37
4.4.1.1. Tempo de espera entre camadas	37
4.4.1.2. Espessura das camadas	38
4.4.1.3. Otimização do processo construtivo	40
4.4.2. INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE COLOCAÇÃO DO BETÃO	41
4.4.3. INFLUÊNCIA DA UTILIZAÇÃO DE DIFERENTES QUANTIDADES DE CIMENTO	43
4.4.4. INFLUÊNCIA DA UTILIZAÇÃO DE CINZAS VOLANTES	45
4.4.5. INFLUÊNCIA DE BETONAR EM SITUAÇÕES DE TEMPERATURA AMBIENTE EXTREMAS	47
4.4.5.1. Temperatura ambiente constante	47
4.4.5.2. Curva sinusoidal de evolução da temperatura ambiente diária	49
4.4.6. INFLUÊNCIA DA RADIAÇÃO SOLAR	51
4.4.7. INFLUÊNCIA DA PERDA DE CALOR POR RADIAÇÃO	56
4.5. CONCLUSÕES GERAIS	58

5. CASO DE ESTUDO – PILAR DE UM DESCARREGADOR DE CHEIAS	59
5.1. CASO DE ESTUDO	59
5.1.1. LOCALIZAÇÃO	59
5.1.2. CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DOS PILARES.....	60
5.2. MODELO DO PILAR DE DESCARREGADOR DE CHEIAS	60
5.2.1. PROPRIEDADES DOS MATERIAIS.....	61
5.2.1.1. Características gerais.....	61
5.2.1.2. Fluência	62
5.2.1.3. Retração	63
5.2.2. CONDIÇÕES FRONTEIRA DO MODELO.....	63
5.2.3. AÇÕES	64
5.2.3.1. Peso Próprio do betão.....	64
5.2.3.2. Sinusoide da temperatura média mensal.....	64

5.2.3. APRESENTAÇÃO DO MODELO	65
5.3. ANÁLISES TERMO-MECÂNICAS.....	66
5.3.1. ANÁLISE DE REFERÊNCIA	67
5.3.1.1. Análise térmica	67
5.3.1.2. Análise mecânica.....	69
5.3.1.3. Risco de fendilhação	72
5.3.2. BETONAGEM EM DIFERENTES ESTAÇÕES DO ANO	74
5.3.2.1. Análises térmicas.....	74
5.3.2.2. Análises mecânicas	76
5.3.2.3. Risco de fendilhação	81
5.3.3. UTILIZAÇÃO DE DIFERENTES PARÂMETROS PARA A LEI DA DUPLA POTÊNCIA	83
5.3.3.1. Análises termo-mecânicas	83
5.3.4. VARIAÇÃO DO COEFICIENTE DE DILATAÇÃO TÉRMICA	88
5.3.4.1. Análises termo-mecânicas	89
5.3.5. EVOLUÇÃO INICIAL DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DO BETÃO.....	94
5.3.5.1. Análises termo-mecânicas	95
5.3.6. CONCLUSÕES DA INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS.....	100
5.3.6.1. Potenciais padrões de fendilhação.....	100
5.3.6.2. Medidas preventivas e alterações ao projeto	102
5.3.6.3. Alteração do teor de cimento.....	102
 6. CONCLUSÕES.....	 105
6.1. CONCLUSÕES GERAIS.....	105
6.2. TRABALHOS FUTUROS.....	106
 BIBLIOGRAFIA.....	 109

ANEXOS

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.2.1 - Processos de transmissão de calor numa barragem (KRÜGER, D.A.V., 2001)	4
Fig.2.2 - Elemento de volume infinitesimal de matéria	6
Fig.2.3 - Superfície inclinada sujeita a radiação solar, adaptado de (Azenha, M.Â.D., 2009)	13
Fig.2.4 - Comparação da evolução das propriedades do betão de acordo com o grau de hidratação (Gutsch e Rostásy, 2001a).....	17
Fig.2.5 - Comparação da evolução das propriedades do betão: idade equivalente (Ji, 2008)	19
Fig.3.1 - Exemplo da distribuição de uma serpentina de refrigeração (esquerda) (Kim, J.K. [et al.], 2001) e da área de influência arrefecida por um tubo (direita) (Derron, A.S.M., 1957).....	27
Fig.3.2 - Princípio de conservação de energia no tubo (Kim, J.K. [et al.], 2001)	28
Fig.4.1 - Nós da malha de elementos finitos em análise (nó 28, 204 e 17).....	31
Fig.4.2 - Geometria do modelo base e camada em análise (vermelho)	33
Fig.4.3 - Gráfico da curva adiabática do betão (370 Kg/m ³ de cimento) e dados para as análises térmicas	34
Fig.4.4 - Malha de elementos finitos de acordo com o faseamento construtivo (desde a terceira camada).....	35
Fig.4.5 - Variação da temperatura no betão: Análise Base	35
Fig.4.6 - Variação da temperatura no betão: última camada betonada	36
Fig.4.7 - Variação da temperatura no betão considerando diferentes tempos de espera: base da camada.....	37
Fig.4.8 - Variação da temperatura no betão considerando diferentes tempos de espera: meio da camada.....	37
Fig.4.9 - Variação da temperatura no betão considerando diferentes tempos de espera: topo da camada.....	38
Fig.4.10 - Variação da temperatura no betão para diferentes espessuras das camadas: base da camada.....	39
Fig.4.11 - Variação da temperatura no betão para diferentes espessuras de camadas: meio da camada.....	39
Fig.4.12 - Variação da temperatura no betão para diferentes espessuras das camadas: topo da camada.....	39
Fig.4.13 - Variação da temperatura no betão em diferentes processos construtivos: base da camada	40
Fig.4.14 - Variação da temperatura no betão em diferentes processos construtivos: meio da camada	40
Fig.4.15 - Variação da temperatura no betão em diferentes processos construtivos: topo da camada	41

Fig.4.16 - Variação da temperatura no betão para diferentes temperaturas de colocação: base da camada	42
Fig.4.17 - Variação da temperatura no betão para diferentes temperaturas de colocação: meio da camada	42
Fig.4.18 - Variação da temperatura no betão para diferentes temperaturas de colocação: topo da camada	42
Fig.4.19 - Gráfico da curva adiabática do betão (300 Kg/m ³ de cimento) e respetivos dados	43
Fig.4.20 - Variação da temperatura no betão utilizando diferentes quantidades de ligante: base da camada	44
Fig.4.21 - Variação da temperatura no betão utilizando diferentes quantidades de ligante: meio da camada	44
Fig.4.22 - Variação da temperatura no betão utilizando diferentes quantidades de ligante: topo da camada	44
Fig.4.23 - Gráfico da curva adiabática do betão com diferentes percentagens de cinzas	45
Fig.4.24 - Variação da temperatura no betão utilizando cinzas volantes: base da camada	46
Fig.4.25 - Variação da temperatura no betão utilizando cinzas volantes: meio da camada	46
Fig.4.26 - Variação da temperatura no betão utilizando cinzas volantes: topo da camada.....	46
Fig.4.27 - Variação da temperatura do betão sujeito a condições extremas Verão/Inverno: base da camada	47
Fig.4.28 - Variação da temperatura do betão sujeito a condições extremas Verão/Inverno: meio da camada	48
Fig.4.29 - Variação da temperatura do betão sujeito a condições extremas Verão/Inverno: topo da camada	48
Fig.4.30 - Tabela e gráfico das sinusoides de temperatura no Verão e no Inverno	49
Fig.4.31 - Variação da temperatura na base da camada: Sinusoide de temperatura ambiente Verão/Inverno	50
Fig.4.32 - Variação da temperatura na base da camada: Sinusoide de temperatura ambiente Verão/Inverno	50
Fig.4.33 - Variação da temperatura no topo da camada: Sinusoide de temperatura ambiente Verão/Inverno	50
Fig.4.34 - Tabela e gráficos do fluxo de radiação solar Verão e Inverno, em situações de céu limpo e nublado	52
Fig.4.35 - Variação da temperatura do betão: Sinusoide de temperatura ambiente de Verão e radiação solar em situação de céu limpo (esquerda) e céu nublado (direita): base da camada	53
Fig.4.36 - Variação da temperatura do betão: Sinusoide de temperatura ambiente de Verão e radiação solar em situação de céu limpo (esquerda) e céu nublado (direita): meio da camada	53
Fig.4.37 - Variação da temperatura do betão: Sinusoide de temperatura ambiente de Verão e radiação solar em situação de céu limpo (esquerda) e céu nublado (direita): topo da camada.....	54

Fig.4.38 - Variação da temperatura do betão: Sinusoide de temperatura ambiente de Inverno e radiação solar em situação de céu limpo (esquerda) e céu nublado (direita): base da camada	55
Fig.4. 39 - Variação da temperatura do betão: Sinusoide de temperatura ambiente de Inverno e radiação solar em situação de céu limpo (esquerda) e céu nublado (direita): meio da camada	55
Fig.4.40 - Variação da temperatura do betão: Sinusoide de temperatura ambiente de Inverno e radiação solar em situação de céu limpo (esquerda) e céu nublado (direita): topo da camada	55
Fig.4.41 - Variação da temperatura no betão considerando perda de calor por radiação: base da camada.....	56
Fig.4.42 - Variação da temperatura no betão considerando perda de calor por radiação: meio da camada.....	57
Fig.4.43 - Variação da temperatura no betão considerando perda de calor por radiação: topo da camada.....	57
Fig.5.1 - Localização geográfica do caso de estudo.....	59
Fig.5.2 - Pilares do descarregador de cheias (vista de cima).....	60
Fig.5.3 - Pilar de descarregador de cheias (corte longitudinal) e localização do corte AA`	61
Fig.5.4 – Evolução do módulo de elasticidade.....	62
Fig.5.5 – Evolução da resistência à tração	62
Fig.5.6 - Lei da dupla potência (Conjunto A).....	63
Fig.5.7 - Lei da dupla potência (Conjunto B).....	63
Fig.5.8 - Temperatura média mensal	65
Fig.5.9 – Geometria do pilar de descarregador de cheias e respetivas condições de apoio	66
Fig.5.10 – Malha de elementos finitos do pilar de descarregador de cheias.....	66
Fig.5.11 – Camada de betão e respetivas zonas de análise	67
Fig.5.12 - Temperatura do betão na 9ª camada: Análise de Referência	68
Fig.5.13 – Tensões σ_x na 9ª camada de betão: Análise de Referência	69
Fig.5.14 - Tensões σ_y na 9ª camada de betão: Análise de Referência	70
Fig.5.15 – Tensões σ_z na 9ª camada de betão: Análise de Referência	71
Fig.5.16 - Índice de fendilhação na 9ª camada: Análise de Referência	72
Fig.5.17 - Temperatura na 9ª camada de betão: Início de betonagem na Primavera	75
Fig.5.18 - Temperatura na 9ª camada de betão: Início de betonagem no Outono	75
Fig.5.19 - Temperatura na 9ª camada de betão: Início de betonagem no Inverno	75
Fig.5.20 - Tensões σ_x na 9ª camada de betão: Primavera	77
Fig.5.21 - Tensões σ_x na 9ª camada de betão: Outono.....	77
Fig.5.22 - Tensões σ_x na 9ª camada de betão: Inverno.....	77
Fig.5.23 - Tensões σ_y na 9ª camada de betão: Primavera	78

Fig.5.24 - Tensões σ_y na 9ª camada de betão: Outono	78
Fig.5.25 - Tensões σ_y na 9ª camada de betão: Inverno	79
Fig.5. 26 - Tensões σ_z na 9ª camada: de betão: Primavera	80
Fig.5.27 - Tensões σ_z na 9ª camada: de betão: Outono	80
Fig.5.28 - Tensões σ_z na 9ª camada: de betão: Inverno	80
Fig.5.29 - Índice de fendilhação na 9ª camada: Primavera	81
Fig.5.30 - Índice de fendilhação na 9ª camada: Outono	82
Fig.5.31 - Índice de fendilhação na 9ª camada: Inverno	82
Fig.5.32 - Tensões σ_x para diferentes parâmetros da lei da dupla potência: base da camada	84
Fig.5.33 - Tensões σ_x para diferentes parâmetros da lei da dupla potência: meio da camada	84
Fig.5.34 - Tensões σ_x para diferentes parâmetros da lei da dupla potência: topo da camada	84
Fig.5.35 - Tensões σ_y para diferentes parâmetros da lei da dupla potência: base da camada	85
Fig.5.36 - Tensões σ_y para diferentes parâmetros da lei da dupla potência: meio da camada	85
Fig.5.37 - Tensões σ_y para diferentes parâmetros da lei da dupla potência: topo da camada	86
Fig.5.38 - Tensões σ_y para diferentes parâmetros da lei da dupla potência: superfície lateral da camada	86
Fig.5.39 - Tensões σ_z para diferentes parâmetros da lei da dupla potência: base da camada	87
Fig.5.40 - Tensões σ_z para diferentes parâmetros da lei da dupla potência: meio da camada	87
Fig.5.41 - Tensões σ_z para diferentes parâmetros da lei da dupla potência: topo da camada	88
Fig.5.42 - Tensões σ_z para diferentes parâmetros da lei da dupla potência: superfície lateral da camada	88
Fig.5.43 - Variação do coeficiente de dilatação térmica	89
Fig.5.44 - Tensões σ_x considerando variação do coeficiente de dilatação térmica: base da camada	90
Fig.5.45 - Tensões σ_x considerando variação do coeficiente de dilatação térmica: meio da camada	90
Fig.5.46 - Tensões σ_x considerando variação do coeficiente de dilatação térmica: topo da camada	91
Fig.5.47 - Tensões σ_y considerando variação do coeficiente de dilatação térmica: base da camada	91
Fig.5.48 - Tensões σ_y considerando variação do coeficiente de dilatação térmica: meio da camada	92
Fig.5.49 - Tensões σ_y considerando variação do coeficiente de dilatação térmica: topo da camada	92
Fig.5.50 - Tensões σ_y considerando variação do coeficiente de dilatação térmica: superfície lateral da camada	92
Fig.5.51 - Tensões σ_z considerando variação do coeficiente de dilatação térmica: base da camada	93
Fig.5.52 - Tensões σ_z considerando variação do coeficiente de dilatação térmica: meio da camada	93
Fig.5.53 - Tensões σ_z considerando variação do coeficiente de dilatação térmica: topo da camada	94
Fig.5.54 - Tensões σ_z considerando variação do coeficiente de dilatação térmica: superfície lateral da camada	94

Fig.5.55 - Otimização da evolução do módulo de elasticidade.....	95
Fig.5.56 – Tensões σ_x considerando crescimento otimizado do módulo de elasticidade: base da camada.....	96
Fig.5.57 – Tensões σ_x considerando crescimento otimizado do módulo de elasticidade: meio da camada.....	96
Fig.5.58 – Tensões σ_x considerando crescimento otimizado do módulo de elasticidade: topo da camada.....	96
Fig.5.59 – Tensões σ_y considerando crescimento otimizado do módulo de elasticidade: base da camada.....	97
Fig.5.60 – Tensões σ_y considerando crescimento otimizado do módulo de elasticidade: meio da camada.....	97
Fig.5.61 – Tensões σ_y considerando crescimento otimizado do módulo de elasticidade: topo da camada.....	98
Fig.5.62 – Tensões σ_y considerando crescimento otimizado do módulo de elasticidade: superfície lateral.....	98
Fig.5.63 – Tensões σ_z considerando crescimento otimizado do módulo de elasticidade: base da camada.....	99
Fig.5.64 – Tensões σ_z considerando crescimento otimizado do módulo de elasticidade: meio da camada.....	99
Fig.5.65 – Tensões σ_z considerando crescimento otimizado do módulo de elasticidade: topo da camada.....	100
Fig.5.66 – Tensões σ_z considerando crescimento otimizado do módulo de elasticidade: superfície lateral.....	100
Fig.5.67 – Camada representativa do pilar de descarregador de cheias (corte transversal) e eventuais padrões de fendilhação nos primeiros 5 dias (esquerda) e em idades posteriores (direita)	101
Fig.5.68 – Corte longitudinal do pilar de descarregador de cheias e eventuais padrões de fendilhação	101

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Valores de referência para as propriedades térmicas do betão	5
Tabela 2 - Condutibilidade térmica de diferentes materiais (Silveira, A.P.C.d., 1996)	25
Tabela 3 - Análises térmicas	32
Tabela 4 - Propriedades do betão do pilar de descarregador de cheias	61
Tabela 5 - Propriedades do betão do descarregador de cheias	62
Tabela 6 - Conjuntos de parâmetros para a lei da dupla potência (t em dias)	62
Tabela 7 - Parâmetros para as sinusoides de temperatura ambiente	65
Tabela 8 - Betonagem em diferentes estações do ano	74

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO GERAL E OBJETIVOS

O estudo de um método construtivo adequado à betonagem de uma estrutura de betão em massa é um procedimento fundamental para a garantia de uma boa qualidade da obra. Muitas vezes, este método construtivo e o ritmo de construção são condicionados pelo controlo das temperaturas geradas no betão durante as primeiras idades. Este controlo térmico do betão deverá assegurar o não aparecimento de fendas capazes de causar graves danos estruturais.

A principal razão da elaboração de análises termo-mecânicas em obras de betão em massa reside no facto de se utilizarem grandes quantidades de betão. O processo de hidratação do cimento resulta na libertação de grandes quantidades de calor, que por sua vez determinam uma elevação das temperaturas do betão muito significativa, dado que neste tipo de estruturas a dissipação do calor gerado é muito lenta. O abaixamento de temperatura subsequente e os gradientes térmicos daí resultantes podem provocar o aparecimento de fendas em idades prematuras.

Os pilares do descarregador de cheias do Aproveitamento Hidroelétrico de Ilisu constituem o caso de estudo abordado nesta dissertação. Estruturas destas dimensões requerem um estudo mais pormenorizado, sendo que a realização de análises termo-mecânicas possibilita uma razoável previsão das temperaturas e tensões no betão.

Estes pilares integram um órgão de segurança do aproveitamento hidroelétrico, o descarregador de cheias. Os pilares são na verdade lâminas de betão armado pré-esforçado com 4 metros de espessura, constituindo o apoio às comportas do descarregador. O descarregador é constituído por seis blocos divididos por juntas injetadas e que dividem o canal de escoamento em vários subcanais.

Um pilar de descarregador de cheias é uma estrutura que necessita de garantir uma elevada resistência mecânica. As suas grandes dimensões e os esforços a que esta se encontra sujeito, requerem também uma quantidade de armaduras bastante elevada, bem como a aplicação de pré-esforço. A existência de pré-esforço determina a necessidade da adoção de um betão com uma quantidade de cimento mais elevada do que a usualmente utilizada em estruturas com espessuras de betão desta ordem de grandeza.

Esta dissertação tem como principal objetivo averiguar a viabilidade do processo construtivo adotado para a betonagem destes pilares, com um betão constituído por uma quantidade de cimento elevada. Atendendo ao estudo do campo de tensões do betão durante as etapas de construção e à realização de estudos paramétricos, será possível determinar a influência das variáveis consideradas no problema. Para este efeito será utilizado o *software* DIANA na realização das diferentes análises térmicas e mecânicas.

A partir das conclusões obtidas será discutida a probabilidade de fendilhação durante o processo construtivo, através de uma interpretação adequada dos resultados. É necessário entender o tipo de fendas que poderão surgir, de modo a avaliar as consequências e a necessidade de adotar medidas de mitigação.

No presente trabalho também serão expostas todas as ferramentas de cálculo utilizadas, bem como as técnicas mais comuns de pré e pós-arrefecimento do betão, que possibilitam a minimização dos efeitos provocados pelas elevações de temperatura durante as primeiras idades.

1.2. ORGANIZAÇÃO DOS CAPÍTULOS

A presente dissertação encontra-se dividida em seis capítulos.

No primeiro capítulo, “Introdução”, são apresentados os principais objetivos desta dissertação e uma perspectiva geral do trabalho desenvolvido. É ainda apresentado de uma forma sumária o caso de estudo abordado.

O segundo capítulo, “Problema termo-mecânico em estruturas de betão”, tem como alvo o estudo das diversas ferramentas necessárias à realização das análises termo-mecânicas. São apresentados os principais fundamentos teóricos e os pressupostos necessários ao tratamento deste tema a partir do Método dos Elementos Finitos. Neste capítulo estão referidas todas as leis fundamentais à determinação da propagação do fluxo de calor no betão, bem como os métodos mais utilizados para a determinação das características térmicas e mecânicas deste.

No terceiro capítulo, “Metodologias de construção em estruturas com grandes massas de betão”, estão apresentados os métodos construtivos mais correntes neste tipo de estruturas. São abordados os fatores mais condicionantes, como por exemplo o ritmo de betonagem, tipos de cofragem e técnicas de pré e pós-arrefecimento. Neste capítulo são ainda referidas algumas especificações de projeto, que consistem na limitação das temperaturas no betão.

Para a concretização do quarto capítulo, “Análises térmicas - estudo paramétrico”, foi elaborado um modelo mais simples do pilar de descarregador de cheias, capaz de reproduzir resultados fiáveis para o campo térmico do betão durante os primeiros dias. Os resultados apresentados neste capítulo são fundamentais para um entendimento dos fatores que mais condicionam as temperaturas do betão. Foram realizados estudos paramétricos, a partir da alteração de certas características do designado Modelo Base e inclusão de outros fenómenos capazes de influenciar o campo térmico do betão.

O quinto capítulo, “Caso de estudo - pilar de um descarregador de cheias”, tem como objetivo a apresentação dos resultados obtidos para o modelo final. Para este modelo foram elaboradas análises térmicas e mecânicas, de modo a determinar as variações de temperaturas e tensões no betão durante a fase construtiva. Adotando uma análise de referência, foram elaborados estudos paramétricos que permitissem determinar a melhor data para o início da betonagem do pilar. Neste capítulo foram ainda determinados resultados para o campo de tensões no betão, adotando diferentes parâmetros para a lei de fluência, leis para a evolução do módulo de elasticidade e coeficiente de dilatação térmica, e ainda utilizando diferentes teores de cimento.

No sexto capítulo, “Conclusões”, são apresentadas de forma mais qualitativa as principais conclusões obtidas nos estudos elaborados ao longo deste trabalho, bem como os trabalhos futuros que são necessários realizar, de forma a validar e completar os resultados obtidos no modelo do pilar de descarregador de cheias.

2

PROBLEMA TERMO-MECÂNICO EM ESTRUTURAS DE BETÃO

2.1. PROBLEMA TÉRMICO

2.1.1. INTRODUÇÃO

O calor é uma forma de energia, em que a sua transmissão é sustentada pelos princípios e leis da termodinâmica. A transmissão de calor entre dois corpos verifica-se sempre no sentido decrescente das temperaturas e com conservação de energia, tendencialmente para uma situação de equilíbrio térmico.

Os modelos numéricos a utilizar em situações que abordem o problema térmico têm que garantir uma análise das variações térmicas do betão associadas às reações químicas que ocorrem na pasta de cimento, e posteriormente deverão contemplar o arrefecimento do betão.

Neste capítulo serão tratados os diferentes tipos de transmissão calor recorrendo a algumas definições sucintas e objetivas das diferentes propriedades físicas associadas ao problema em causa. A determinação do calor gerado no betão devido ao processo de hidratação do cimento também será alvo de estudo nesta fase, bem como nos capítulos subsequentes.

Os procedimentos adotados para o caso de estudo também serão expostos no presente capítulo.

2.1.2. CONSIDERAÇÕES GERAIS

O calor desenvolvido no processo de hidratação do cimento vai conduzir a um aumento de temperatura no betão nos dias a seguir à betonagem, sendo este dissipado posteriormente para os meios vizinhos por processos de transmissão de calor. Havendo diferenças de temperatura entre meios estão reunidas as condições para a transferência de calor, intervindo assim, todos os processos de transmissão: condução, convecção e radiação. A consideração separada destes fenómenos permite uma simplificação da análise. Contudo convém referir que os três processos ocorrem simultaneamente. A análise deverá garantir que os erros associados a esta abordagem individual não sejam significativos.

Nas barragens, ou noutras estruturas com massas de betão significativas, são diversas as variáveis que condicionam o desenvolvimento e perda de calor, tais como os materiais utilizados, os métodos construtivos e o clima, ver Fig. 2.1.

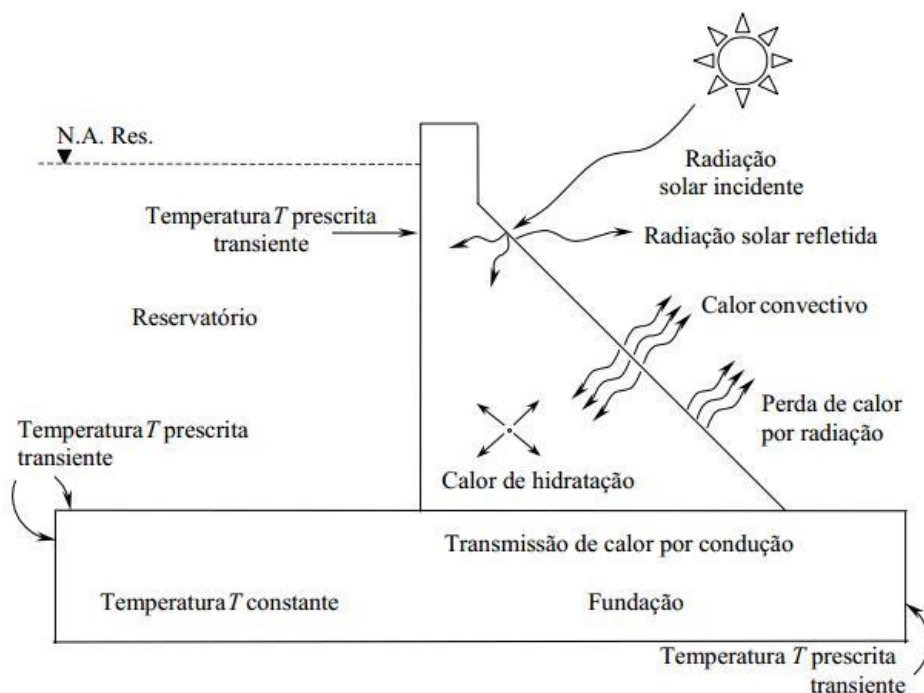


Fig.2.1 - Processos de transmissão de calor numa barragem (KRÜGER, D.A.V., 2001)

2.1.3. CONDUÇÃO DE CALOR

2.1.3.1. Transmissão de calor por condução

A condução é o clássico processo de transmissão de calor num meio sólido. A troca de energia é garantida pelo movimento de elétrons livres e pelo movimento aleatório de moléculas.

Para além dos gradientes de temperatura devidos às condições fronteiras do problema térmico, no caso em estudo do pilar de um descarregador de cheias essa transmissão também ocorre devido à betonagem por camadas da estrutura e ao calor gerado pela hidratação do cimento. As diferentes fases construtivas obrigam a que o betão fresco assente sempre em betão previamente existente que foi betonado dias/horas antes, conduzindo deste modo à existência de diferenças de temperatura entre camadas, que levam à ocorrência da transmissão de calor por condução.

Quando o sistema atingir o estado de equilíbrio, não ocorre variação de temperatura no tempo, designando-se assim por regime estacionário. No presente caso as trocas de calor processam-se em regime variável, ou transiente, com variação de temperatura no tempo.

2.1.3.2. Propriedades térmicas

De modo a facilitar a compreensão do fenómeno de transmissão de calor por condução é necessário explicitar alguns conceitos fundamentais, tais como: calor específico, capacidade calorífica, condutibilidade térmica e difusibilidade.

O calor específico c traduz-se pela quantidade de calor necessária para elevar de uma unidade de temperatura uma unidade de massa de um corpo, sem mudança de estado. Exprime-se nas unidades $J/(Kg K)$.

A capacidade calorífica ou calor específico volumétrico ρc traduz-se pelo produto do calor específico pela massa específica ρ . Exprime-se nas unidades J/(m³ K).

A condutibilidade térmica k é a quantidade de calor que atravessa perpendicularmente uma superfície, de área unitária, na unidade de tempo, quando há uma diferença de temperatura unitária entre superfícies, afastadas de uma unidade de comprimento. Exprime-se nas unidades W/(m K).

O quociente entre a condutibilidade térmica e a capacidade calorífica é designado difusibilidade térmica α_T (m²/s).

$$\alpha_T = \frac{k}{\rho c} \quad (2.1)$$

Em Azenha, M.Â.D., 2004 estão definidos métodos experimentais e analíticos para a determinação da condutibilidade térmica, bem como métodos experimentais para a determinação do calor específico.

Na Tabela 1 encontram-se alguns valores de referência para estas propriedades mecânicas no betão (Silveira, A.F.d., 1961).

Tabela 1 - Valores de referência para as propriedades térmicas do betão

	k (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	α_T (m ² /s)	c (J.Kg ⁻¹ .K ⁻¹)
Betão	1.2 – 2.4	6 - 11	840 - 1170

2.1.3.3. Equação de condução de calor

A determinação do campo de temperaturas do betão é necessário à resolução do problema térmico, sendo que a Lei de Fourier rege a condução de calor num sistema.

$$q_x'' = \frac{q_x}{A} = -k \frac{\delta T}{\delta x} \quad (2.2)$$

em que,

q_x – fluxo de calor (W)

q_x'' – fluxo de calor por unidade de área (W/m²)

k – condutibilidade térmica (W/(m K))

$\frac{\delta T}{\delta x}$ – gradiente térmico entre duas superfícies sólidas separadas de δx

Como auxílio à explicação da equação geral de condução consideremos o seguinte elemento de volume infinitesimal (ver Fig. 2.2).

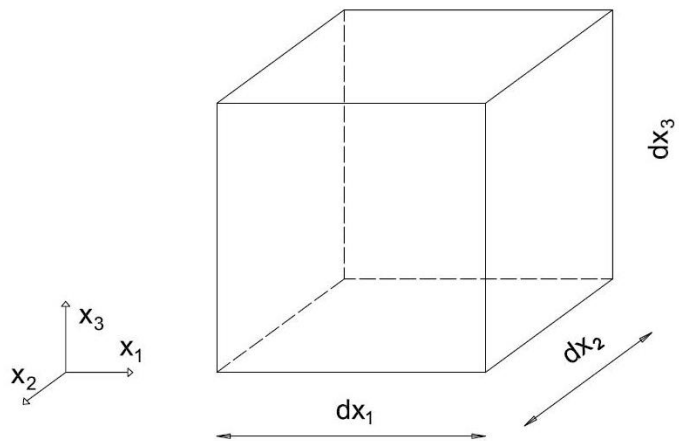


Fig.2.2 - Elemento de volume infinitesimal de matéria

De forma a existir condução de calor, admite-se a existência de um gradiente térmico e de três fluxos de entrada q_{x_i} em direções perpendiculares às respetivas superfícies, que se traduzem nas faces opostas de saída de calor $q_{x_i+\partial x_i}$.

$$q_{x_i+\partial x_i} = q_{x_i} + \frac{\partial q_{x_i}}{\partial x_i} dx_i \quad ; \quad i = 1, 2, 3 \quad (2.3)$$

A primeira lei da termodinâmica assenta num princípio de conservação de energia que, tal como referido em Afonso, C.F.A., 2012, para um sistema qualquer se traduz por:

$$\text{Energia que entra} - \text{Energia que sai} = \text{saldo} \quad (2.4)$$

No caso em questão,

$$\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} = \dot{E}_{st} - \dot{E}_g \quad (2.5)$$

$$\dot{E}_g = \dot{Q} dx_1 dx_2 dx_3 \quad (2.6)$$

$$\dot{E}_{st} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dx_1 dx_2 dx_3 \quad (2.7)$$

em que,

t – tempo (s)

\dot{E}_{in} – taxa de energia que entra (W)

\dot{E}_{out} – taxa de energia que sai (W)

\dot{E}_{st} – taxa de energia armazenada (W)

\dot{E}_g – taxa de energia gerada (W)

\dot{Q} – taxa de geração de calor (energia) numa unidade de volume infinitesimal (W/m³)

Substituindo em (2.5) as expressões (2.6) e (2.7) e considerando os fluxos de calor de entrada e saída no elemento de volume infinitesimal de matéria representados respetivamente por \dot{E}_{in} e \dot{E}_{out} , temos que:

$$q_{x_1} + q_{x_2} + q_{x_3} - (q_{x_1+\partial x_1} + q_{x_2+\partial x_2} + q_{x_3+\partial x_3}) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dx_1 dx_2 dx_3 - \dot{Q} dx_1 dx_2 dx_3 \quad (2.8)$$

Atendendo a (2.3), a equação (2.9) pode ser simplificada:

$$-\frac{\partial q_{x_1}}{\partial x_1} dx_1 - \frac{\partial q_{x_2}}{\partial x_2} dx_2 - \frac{\partial q_{x_3}}{\partial x_3} dx_3 = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dx_1 dx_2 dx_3 - \dot{Q} dx_1 dx_2 dx_3 \quad (2.9)$$

Ao fluxo nas diferentes direções está associado uma área de sólido representado no plano perpendicular respetivo.

$$q_{x_i} = -k_i dx_j dx_k \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (2.10)$$

em que $i=1,2,3$; $j=2,3,1$; $k=3,1,2$. Substituindo em (2.9) obtemos a equação geral de Fourier associada ao campo de temperaturas $T(x, y, z, t)$:

$$\frac{\partial}{\partial x_1} \left(k_1 \frac{\partial T}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_2} \left(k_2 \frac{\partial T}{\partial x_2} \right) + \frac{\partial}{\partial x_3} \left(k_3 \frac{\partial T}{\partial x_3} \right) + \dot{Q} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.11)$$

Sendo o betão um material isotrópico e homogéneo é razoável admitir que a sua condutibilidade é constante nas três direções ($k_1 = k_2 = k_3 = k$):

$$k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial x_3^2} \right) + \dot{Q} - \rho c \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (2.12)$$

A expressão (2.12) poderá tornar-se ainda mais compacta se atendermos ao facto de que o multiplicador da condutibilidade térmica está relacionado com a equação de Laplace e que a capacidade calorífica pode ser representada por C .

$$k \nabla^2 T + \dot{Q} - C \dot{T} = 0 \quad (2.13)$$

Apesar de não ser aplicável ao caso de estudo é de referir que se estivéssemos em regime permanente, ou seja, a temperatura fosse constante ao longo do tempo, a expressão (2.13) poderia ser traduzida pela expressão (2.15) ao qual está associado o campo de temperaturas $T(x, y, z)$.

$$k \nabla^2 T = 0 \quad (2.14)$$

2.1.4. CALOR DE HIDRATAÇÃO

2.1.4.1. Composição e hidratação do cimento

Em algumas obras é fundamental a consideração de geração de calor no betão. A hidratação do cimento é um processo exotérmico, que leva ao desenvolvimento de grandes quantidades de calor em obras de betão, sendo este fenómeno preponderante em casos de construções de betão em massa, como por exemplo as barragens.

O calor desenvolvido na pasta de cimento depende da sua composição, como também da relação água-cimento, temperatura inicial, finura do cimento e das condições de conservação das amostras para a determinação do calor de hidratação. Atendendo à composição do cimento é de referir que este é usualmente dividido em 4 compostos: silicato tricálcico (SC_3), silicato bicálcico (SC_2), aluminato tricálcico (AC_3) e aluminoferrato tetracálcico (C_4AF). É possível fazer uma correção ao cimento, alterando as proporções de cada composto, mas tendo sempre em atenção que estas alterações mudam a resistência mecânica. Resumidamente, a solução mais vantajosa em termos de redução do calor de hidratação passa por uma solução com menos SC_3 e mais SC_2 , combinado com menos AC_3 e mais C_4AF (Silveira, A.F.d., 1961).

A temperatura inicial influencia as temperaturas atingidas, já que o calor específico varia com esta temperatura. Um aumento da quantidade de água origina um aumento do calor de hidratação, até relações água-cimento de cerca de 0.45, a partir do qual o calor gerado já não aumenta com a quantidade de água. A superfície das partículas do cimento influencia o calor gerado, visto que a ação da água se processa através das partículas. A redução da temperatura de conservação retarda o desenvolvimento de calor, mas não tem efeito sobre o calor total desenvolvido.

Para as mesmas condições de conservação e mesma relação água-cimento podemos afirmar que a quantidade de calor libertada pelo cimento em pasta pura ou misturado no betão é a mesma, sendo deste modo possível determinar o calor de hidratação gerado no betão estudando apenas a pasta de cimento.

2.1.4.2. Calorimetria adiabática

Geralmente os ensaios associados à calorimetria adiabática são efetuados em pastas de cimento, mas poderão ser realizados em amostras de betão. No entanto, se este for efetuado em pasta de cimento é necessário conhecer a proporção de cimento.

Os princípios dos ensaios associados a esta calorimetria baseiam-se no facto de não permitirem trocas de calor entre a amostra e o ambiente envolvente (condições adiabáticas). Logo, todo o calor gerado dentro da amostra devido às reações exotérmicas da pasta de cimento é convertido em aumento de temperatura.

Em condições adiabáticas a expressão (2.13) traduz-se em:

$$\dot{Q} = \rho c \dot{T} \quad (2.15)$$

Admitindo agora um intervalo de variação de temperatura entre o instante inicial da hidratação e o instante t , e ainda a proporção de cimento existente no betão, facilmente se obtém a expressão:

$$Q(t) = \frac{\Delta T \rho c}{C} \quad (2.16)$$

em que,

$Q(t)$ – calor gerado no betão ao longo do tempo (J/Kg)

C – teor de cimento no betão (kg/m^3)

ΔT – variação da temperatura entre o instante inicial e o instante t

Um dos problemas desta calorimetria é que requer uma determinação prévia da capacidade calorífica, ou então uma estimativa, que poderá levar a erros na avaliação da geração de calor.

Na prática a reação de hidratação pode ocorrer em condições aproximadamente adiabáticas no interior de grandes massas de betão, como tal esta calorimetria é adequada ao caso de estudo do pilar de descarregador de cheias.

Existem outros ensaios associados à calorimetria semi-adiabática e isotérmica. Sendo que a calorimetria isotérmica permite medir diretamente o calor de hidratação do cimento através de sensores de fluxo, revelando-se como a calorimetria mais precisa e exata. No entanto, para o caso de estudo são fornecidas as curvas de geração de calor na pasta de cimento associadas a ensaios adiabáticos. Para um estudo mais aprofundado do resto dos ensaios, ficam as referências (Azenha, M.Â.D., 2009, Azenha, M.Â.D., 2004, Soares, J., 2012).

2.1.4.3. Influência de aditivos no calor de hidratação

Existem diversos aditivos que permitem diminuir o calor de hidratação, sendo os mais utilizadas as cinzas, escórias de alto forno, e menos frequentemente a sílica de fumo. No entanto, é necessário ter em conta que estes aditivos também provocam modificações nas propriedades mecânicas do betão, devido às alterações que provocam no processo de hidratação.

As cinzas volantes são subprodutos industriais que resultam da captação de poeiras de gases de combustão das fornalhas alimentadas com carvão pulverizado. Existem também as cinzas vulcânicas, que provêm de magmas ricos em sílica que solidificaram rapidamente durante a erupção, que deste modo adquiriram um estado amorfo. As cinzas adicionadas ao cimento não endurecem quando são misturadas em água. Estas têm que estar moídas, de modo a reagirem com o hidróxido de cálcio do cimento e, formarem compostos semelhantes aos existentes no endurecimento de materiais hidráulicos.

Em Azenha, M.Â.D., 2004 verifica-se um estudo mais aprofundado relativamente aos restantes aditivos no cimento. No presente caso de estudo foram fornecidos resultados experimentais de calorimetrias adiabáticas para cimentos com cinzas.

2.1.5. CONDIÇÕES FRONTEIRA

2.1.5.1. Transmissão de calor por convecção

A convecção é o processo de transmissão de energia calorífica por intermédio do movimento de um fluido, quando se verifica uma diferença de temperatura entre este e a superfície de um sólido. Este processo de transmissão de calor desdobra-se em vários tipos, contudo apenas dois têm interesse para o estudo do problema térmico no betão.

A convecção natural que ocorre devido às diferenças de velocidade do fluido, provocadas pelas diferenças de temperatura. Por outro lado, a convecção forçada que surge devido à existência de causas exteriores, como por exemplo, o vento que provoca o movimento do fluido independentemente das variações térmicas. Apesar de não ser tão frequente, no caso das barragens verifica-se a sua existência sempre que o vento atua sobre os paramentos, bem como no processo de arrefecimento do betão através de correntes de ar frio nas faces, e nos processos de hidratação em que se utilizam tubos embebidos para a circulação de água fria (Silveira, A.F.d., 1961). Ainda neste tipo de convecção, se não houver variação brusca da velocidade do fluido classifica-se o regime como laminar, sendo deste modo possível adotar métodos analíticos para a resolução do problema. Caso contrário classifica-se como regime turbulento que apenas é tratado recorrendo a métodos empíricos.

Supondo o contacto entre a superfície de um sólido e um fluido, a quantidade de calor transmitida entre os dois meios pode ser traduzida pela Lei de Newton. O sinal negativo na equação (2.17) é devido ao facto do fluxo de calor ocorrer no sentido decrescente das temperaturas.

$$q_c'' = -h_c(T_s - T_f) \quad (2.17)$$

em que,

q_c'' – fluxo de calor por unidade de área devido à transmissão de calor por convecção (W/m²)

h_c – coeficiente de convecção (W/(m² K))

T_s ; T_f – temperatura do sólido e do fluido em contacto, respetivamente.

É oportuno referir que o valor de h_c não depende destas temperaturas, T_s e T_f , no caso de convecção forçada, mas depende em convecção natural. É possível obter um melhor entendimento relativo à determinação desta característica associada ao regime natural e forçado, estudando as referências (Silveira, A.F.d., 1961, Silveira, A.P.C.d., 1996). No entanto, para além do regime de convecção e das temperaturas, este coeficiente depende também da forma e dimensões da superfície sólida.

Apesar do coeficiente de convecção depender destes fatores, no âmbito do caso de estudo adotou-se uma formulação apresentada em (Jonasson, J.-E., 1994), em que o coeficiente de convecção apenas depende da velocidade do vento, v .

$$h_c = \begin{cases} 5.6 + 3.95v & v \leq 5\text{m/s} \\ 7.6v^{0.78} & v > 5\text{m/s} \end{cases} \quad (2.18)$$

Existem outras propostas de mais autores que permitem a determinação do seu valor em função da velocidade do fluido, tal como é possível verificar em Azenha, M.Â.D., 2004, Azenha, M.Â.D., 2009, Silveira, A.F.d., 1961. No entanto, para velocidades do vento até 5m/s verifica-se que os resultados propostos pelos vários autores convergem para valores do coeficiente de convecção bastante similares.

2.1.5.2. Transmissão de calor por radiação

A radiação térmica é um processo de transmissão de calor que depende, na sua essência, da energia emitida por um corpo devido à sua temperatura. É o único caso de transmissão térmica que não requer a presença de um meio material, sendo até mais eficaz no vácuo.

A definição de alguns conceitos fundamentais associados à radiação permite um melhor entendimento deste fenómeno, (Silveira, A.F.d., 1961): o fluxo radiante, que se traduz pela quantidade de energia

incidente numa superfície de um corpo por unidade de tempo; a radiância que é o quociente entre o fluxo emitido total através de um elemento de superfície de um corpo e a área dessa superfície; e por último, a irradiância, que se traduz pelo quociente entre o fluxo total de energia radiante e a área da superfície do corpo que a recebe.

A consideração da radiação térmica implica a ponderação da importância das suas diferentes frações: absorvidade (α), refletividade (ρ) e emissividade (ε). A soma das diferentes parcelas tem que ser igual à unidade:

$$\alpha + \rho + \varepsilon = 1 \quad (2.19)$$

Relativamente à absorvidade, define-se corpo negro ou radiador perfeito qualquer corpo que absorva todas as radiações incidentes ($\alpha = 1$). É importante referir que quando se trata o fenómeno da radiação admite-se a formulação teórica do corpo negro, cujas características se comparam facilmente com os corpos reais. O intuito deste conceito passa por simplificar este fenómeno de transmissão de calor.

Em termos práticos, a transferência de calor por radiação poder ser representada como o saldo entre a energia libertada e absorvida, ou seja, a diferença entre a radiância e a irradiância, que se traduz em:

$$q_r'' = \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_{sur}^4) \quad (2.20)$$

em que,

q_r'' – fluxo de calor por unidade de área devido à transmissão de calor por radiação (W/m^2)

ε – emissividade do betão

σ – constante de Stefan-Boltzmann ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W/(m}^2\text{K}^4)$)

T_s – temperatura da superfície (K)

T_{sur} – temperatura do corpo negro (K)

2.1.5.3. Equação convecção-radiação

A análise do caso em estudo sugere uma abordagem mais simples na consideração da transmissão de calor por radiação. Em situações em que a convecção e a radiação têm lugar ao mesmo tempo, é razoável admitir a existência de um coeficiente de transmissão convecção-radiação h_{cr} :

$$h_{cr} = h_c + h_r \quad (2.21)$$

O coeficiente de radiação h_r pode ser traduzido pela expressão (2.22). Esta expressão é uma linearização de (2.20) válida para as diferenças de temperatura correntes em estruturas de betão.

$$h_r = \varepsilon [4.8 + 0.075(T_{amb} - 278.15)] \quad (2.22)$$

em que,

T_{amb} – temperatura do ar ambiente (K)

A emissividade do betão é variável porque depende da cor da superfície. Contudo, devido à inexistência de mais dados para o caso em estudo, o valor a adotar será 0.88, já que este se encontra dentro de intervalos propostos para a emissividade do betão (Silveira, A.P.C.d., 1996), chegando mesmo a ser utilizado noutras referências (Azenha, M.Â.D., 2004, Azenha, M.Â.D., 2009).

A grandeza h_{cr} permite resolver de forma simples e adequada o problema da perda de calor por radiação, já que possibilita acoplar o fenómeno agora abordado, com a Lei de Newton utilizada para a convecção.

$$q''_{cr} = -h_{cr}(T_s - T_f) \quad (2.23)$$

em que,

q''_{cr} – fluxo de calor por unidade de área devido à transmissão de calor por convecção-radiação (W/m^2)

A consideração da transmissão de calor por radiação de forma análoga ao processo considerado na convecção é viável devido às características de emissividade e absorvidade do betão, (Azenha, M.Â.D., 2009). O tratamento das condições fronteira recorrendo a (2.23) é muito usual e é referenciado em diversos casos de estudo (Azenha, M. and Faria, R., 2008, Azenha, M. [et al.], 2011, Conceição, J. [et al.], 2012, Faria, R. [et al.], 2006). O caso de estudo abordado em (Faria, R. [et al.], 2006) expõe um tratamento das condições fronteira associadas à convecção-radiação muito idêntico ao aqui apresentado, no qual propõe, inclusive, a utilização das equações (2.22) e (2.22) para a determinação dos coeficientes de convecção e radiação, respetivamente.

2.1.5.4. Coeficiente equivalente de transmissão de calor

Muitas vezes, em casos práticos, a superfície de betão não se encontra em contacto direto com o ar. Durante um determinado período de tempo do processo construtivo é frequente usar um coeficiente que considere a existência de cofragens, coberturas de plástico, entre outros. Logo, uma das formas mais utilizadas para resolver este problema é através da utilização de um coeficiente equivalente de transmissão de calor (Azenha, M.Â.D., 2004, Conceição, J. [et al.], 2012, Faria, R. [et al.], 2006):

$$h_{eq} = \left(\frac{1}{h_{cr}} + \sum_{i=1}^n \frac{e_i}{k_i} \right)^{-1} \quad (2.24)$$

em que,

e_i – espessura do material i (m)

k_i – condutibilidade térmica do material i ($W/(m K)$)

A expressão (2.24) permite resolver o problema de forma análoga à utilizada na determinação da resistência total de um sistema elétrico em série. Deste modo, obtém-se um coeficiente que deverá substituir o coeficiente de convecção-radiação na expressão (2.23) durante o processo construtivo.

2.1.5.5. Radiação solar

A radiação solar é tratada de forma independente da radiação exposta em 2.1.5.2. Em estruturas de betão em massa, tal como a que está a ser alvo de estudo, a radiação solar assume uma importância

considerável relativamente à propensão de fenómenos relacionados com o aparecimento de fendas superficiais.

É usual separar o conceito de radiação solar em duas parcelas: direta e difusa. A radiação difusa corresponde à parte que foi difundida devido à composição da atmosfera. A radiação direta é a parcela que atinge a Terra, que não sofreu qualquer fenómeno de absorção ou desvio de radiação.

Em superfícies de betão inclinadas a determinação da radiação solar obriga à consideração de vários parâmetros geométricos (ver Fig.2.3):

- \bar{n} : versor normal à superfície inclinada;
- α : ângulo entre o paramento e a superfície horizontal (°);
- ψ : azimuth do versor \bar{n} no plano horizontal (°);
- h : elevação do sol (°);
- i : ângulo de incidência do raio solar em relação à normal à superfície inclinada (°).

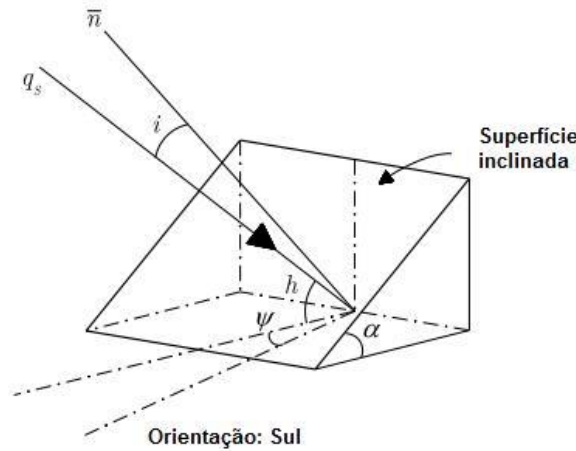


Fig.2.3 - Superfície inclinada sujeita a radiação solar, adaptado de Azenha, M.Â.D., 2009

Em Azenha, M.Â.D., 2009 descreve-se um processo para determinar a radiação solar sem recorrer a tabelas e ábacos, considerando um conjunto de fórmulas propostas por diversos autores, que são facilmente programáveis e permitem a determinação dos diferentes ângulos em causa.

- Ω : ângulo horário, que caracteriza, para um dado instante, a posição da Terra relativamente ao Sol. Assume o valor 0° para t=0h, -180° para t=-12h e 180° para t=12h.

$$\Omega = 15t \quad (2.25)$$

- δ : declinação do sol, que é o ângulo entre os raios solares e o plano que define o equador da Terra. Durante o ano varia entre os valores de 23.44° Norte e 23.44° Sul. Esta expressão depende apenas do número do dia do ano, d :

$$\sin(\delta) = 0.39782 \sin(4.871 + \frac{\pi}{180} d + 0.033 \sin(\frac{\pi}{180} d)) \quad (2.26)$$

- h : a elevação solar é determinada tendo por base a localização da superfície através da latitude, φ (°), e também com o conhecimento de δ e Ω .

$$\sin(h) = \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \cos(\Omega) \quad (2.27)$$

- ψ : o azimute é determinável a partir do conhecimento de h , Ω e δ .

$$\sin(\psi) = \frac{\cos(\delta) \sin(\Omega)}{\cos(h)} \quad (2.28)$$

- i : é o ângulo de incidência, que permite determinar a radiação solar absorvida pela superfície.

$$\cos(i) = \cos(\alpha) \sin(h) + \sin(\alpha) \cos(h) \cos(\psi) \quad (2.29)$$

No entanto, para a determinação do valor de radiação solar absorvida por uma determinada superfície é necessário conhecer também o valor de radiação que atinge essa mesma superfície q_m , bem como a absorvidade solar α_s que poderá variar entre valores de 0.5 e 0.6 dependendo da cor da superfície (Azenha, M.Â.D., 2004).

$$q_m = q_0 e^{\frac{-T_l}{0.9+9.4\sin(h)}} \quad (2.30)$$

em que,

h – altura solar (°)

q_0 – constante solar (1367W/m²)

T_l – fator que traduz a espessura ótica da atmosfera podendo assumir diferentes valores: 1 se o céu estiver limpo e seco. Contudo, habitualmente estará entre 3 e 7, sendo que em cidades mais poluídas assume valores próximos de 6 e 7. Em Silveira, A.F.d., 1961 encontra-se referenciado um valor entre 1.8 e 3 para céu limpo e em zonas poluídas 8 ou 9.

Finalmente admite-se $q_{s,betão}$ como a radiação realmente absorvida pela superfície (W/m²):

$$q_{s,betão} = \alpha_s q_m \cos(i) \quad (2.31)$$

Exposto (2.30) e (2.30) poderemos modelar a radiação como sendo uma condição fronteira adicional à equação de convecção-radiação.

2.1.6. TRATAMENTO DO PROBLEMA TÉRMICO PELO MEF

O Método dos Elementos Finitos (MEF) permite-nos a determinar o campo de temperatura gerado devido à hidratação da pasta de cimento. A necessidade em recorrer a este tipo de ferramentas numéricas é muito comum em casos em que é difícil a obtenção de soluções analíticas para as equações diferenciais.

O problema térmico implica a consideração de duas situações distintas, que terão que ser consideradas em simultâneo pelo método dos elementos finitos. É necessário um acoplamento entre a equação associada ao problema térmico do betão nas primeiras idades (2.12) e as equações relativas às condições fronteira (2.23) e (2.23). Um maior detalhe de como se chega à equação final pode ser

obtido em (Azenha, M.Â.D., 2009), como tal fica aqui apresentada apenas a ferramenta principal de trabalho que pode ser facilmente computadorizada.

$$\left(\frac{D}{\Delta t} + G\right) T_{n+1} = F_{T,n+1} + F_{Q,n+1} + \frac{D}{\Delta t} T_n \quad (2.32)$$

em que,

$$D = \int_{\Omega^e} N^T \rho c N \, d\Omega \quad (2.33)$$

$$G = \int_{\Omega^e} \nabla N^T k \nabla N \, d\Omega + \int_{\Gamma_q^e} N^T h_{cr} N \, d\Gamma_q \quad (2.34)$$

$$F_{T,n+1}^e = \int_{\Gamma_q^e} N^T h_{cr} T_{amb,n+1} \, d\Gamma_q \quad (2.35)$$

$$F_{Q,n+1}^e = \int_{\Omega^e} N^T \dot{Q}_{n+1} \, d\Omega \quad (2.36)$$

Os símbolos Ω^e e Γ_q referem-se a domínios diferentes para a aplicação dos integrais. O símbolo Ω^e está associado ao volume infinitesimal de matéria, que foi exposta em 2.1.3.3, enquanto que Γ_q é relacionável com a equação convecção-radiação que apenas se aplica nas fronteiras do betão, em que seja necessário a consideração destes fenómenos de transmissão de calor.

A equação (2.32) tem em consideração um esquema “backward-Euler”, de modo a considerar a variação da temperatura no tempo como sendo uma taxa entre duas temperaturas em instantes temporais sucessivos. Para além desta consideração, é importante referir que a temperatura local é interpolada a partir das temperaturas nodais, usando uma matriz com as funções de interpolação N .

A resolução da equação (2.32) implica a realização de uma análise não-linear, recorrendo a um processo iterativo que permita a sua resolução. Tal acontece devido ao facto de $F_{Q,n+1}^e$ depender de \dot{Q}_{n+1} , que por sua vez depende de T_{n+1} , ou seja, do calor de hidratação no betão no instante $n + 1$ (ver expressão (2.17)). Sendo assim, para a determinação do campo de temperaturas T_{n+1} , o procedimento baseado no método de Newton-Raphson é geralmente adotado. A aplicabilidade desta equação abrange ainda elementos finitos 1D, 2D e 3D, mesmo sendo estes diferentes nas condições fronteira e no betão propriamente dito.

2.2. PROBLEMA MECÂNICO

2.2.1. INTRODUÇÃO

O betão é um material com fraca resistência à tração e com elevado coeficiente de dilatação térmica. Logo, as variações de temperatura no betão nas primeiras idades poderão conduzir a uma fendilhação prematura. Deste modo é necessário a determinação do campo de tensões e extensões de forma a apurar a viabilidade dos métodos construtivos adotados, bem como o ligante utilizado.

A partir dos resultados obtidos para o problema térmico é necessário proceder à análise mecânica da estrutura em causa, visto que já foi obtido o historial de temperaturas e dos graus de hidratação (definido em 2.2.2.1) ao longo dos diversos instantes em análise. O campo de temperaturas obtido pela análise térmica está associado aos nós da estrutura. Logo, é necessário uma função interpoladora que

permita obter as temperaturas nos pontos de Gauss dos elementos da malha, já que as tensões e deformações são calculadas nestes pontos.

Qualquer método de resolução e de determinação das propriedades mecânicas deverá contabilizar a idade do betão e a temperatura a que este se encontra sujeito, simultaneamente. Sendo deste modo necessário contabilizar a variável tempo referente à idade do betão. Por outro lado, na abordagem do problema térmico apenas foi necessário o campo de temperaturas.

É frequente a utilização de dois métodos para a determinação das propriedades mecânicas do betão, sendo estes baseados no grau de hidratação e na maturidade. Ambos serão alvo de maior detalhe no presente capítulo.

2.2.2. GRAU DE HIDRATAÇÃO

2.2.2.1. Conceito e definição

O grau de hidratação é definido pela razão entre a quantidade de cimento que já reagiu num determinado instante e a quantidade total de cimento no instante inicial. Em termos práticos, este poderá ser quantificado a partir do calor libertado.

$$\alpha(t) = \int_{\Omega^e} \frac{\dot{Q}}{Q_{pot}} dt = \frac{Q(t)}{Q_{pot}} \quad (2.37)$$

em que,

$\alpha(t)$ – grau de hidratação do betão no instante t

$Q(t)$ – quantidade de calor libertado pelo betão até ao instante t

Q_{pot} – quantidade de calor potencialmente libertável em caso de hidratação completa do cimento

A incógnita Q_{pot} tem a designação de calor potencial, porque em grande parte dos casos a hidratação total não é atingida. A distribuição das partículas da água em relação às partículas de cimento poderá não ser a ideal para que a hidratação ocorra na totalidade. Há uma clara influência da relação água-cimento, que conduz a graus de hidratação máximos distintos e que poderão ser determinantes para as resistências mecânicas obtidas para o betão (Azenha, M.Â.D., 2004).

2.2.2.2. Propriedades mecânicas do betão em função do grau de hidratação

Algumas das características mecânicas do betão podem ser determinadas em função da evolução do grau de hidratação. A fórmula mais universal para determinar essas mesmas características assenta na expressão base (2.38) proposta em Rostásy [et al], 2001.

$$X_i(\alpha) = X_{i1} \left(\frac{\alpha - \alpha_0}{1 - \alpha_0} \right)^n \quad (2.38)$$

em que,

$X_i(\alpha)$ –propriedade mecânica em análise para o grau de hidratação α

X_{i1} – valor da propriedade mecânica em análise para a hipótese de $\alpha = 1$

n – parâmetro (assume diferentes valores)

α_0 – grau de hidratação abaixo do qual as propriedades mecânicas são nulas

A resistência à compressão $f_c(\alpha)$, o módulo de elasticidade $E_c(\alpha)$ e a resistência à tração $f_{ct}(\alpha)$ do betão podem ser facilmente calculados substituindo X_i e n da expressão (2.37).

$$f_c(\alpha) = f_{c1} \left(\frac{\alpha - \alpha_0}{1 - \alpha_0} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (2.39)$$

$$E_c(\alpha) = E_{c1} \left(\frac{\alpha - \alpha_0}{1 - \alpha_0} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.40)$$

$$f_{ct}(\alpha) = f_{ct1} \left(\frac{\alpha - \alpha_0}{1 - \alpha_0} \right) \quad (2.41)$$

O parâmetro n é o principal responsável pela evolução das diferentes propriedades mecânicas com o grau de hidratação. A partir da Fig.2.4 verificamos que o módulo de elasticidade é a propriedade que evolui mais rapidamente, seguido da resistência à tração e posteriormente da resistência à compressão.

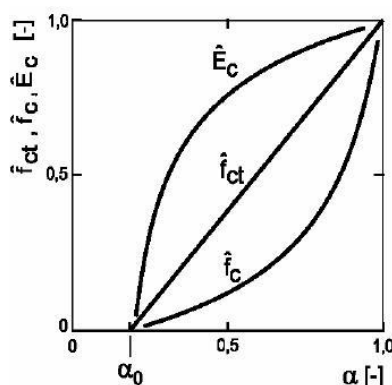


Fig.2.4 - Comparação da evolução das propriedades do betão de acordo com o grau de hidratação (Gutsch e Rostásy, 2001a)

2.2.3. MATURIDADE E IDADE EQUIVALENTE

2.2.3.1. Conceito e definição

Atendendo à variável tempo t , e a partir do conhecimento da história de temperaturas $T(\tau)$, é possível determinar as diferentes propriedades mecânicas do betão, de acordo com o conceito de maturidade.

Teoricamente o conceito de maturidade foi definido em 1951 por Saúl (Azenha, M.Â.D., 2004): “...betões com a mesma mistura e com o mesmo grau de maturidade têm a mesma resistência, qualquer que tenha sido a combinação de tempo e temperatura para atingir esse grau de maturidade”.

Posteriormente, apareceram várias formulações matemáticas com o intuito de caracterizar a maturidade M . Atualmente, a formulação que melhor traduz este conceito é a expressão (2.42).

$$M(t, T) = \int_0^t K(T(\tau)) d\tau \quad (2.42)$$

Para o caso do betão, a cinética de hidratação do cimento pode ser traduzida de acordo com uma lei de Arrhenius, sendo assim possível determinar $K(T)$.

$$K(T) = Ae^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (2.43)$$

em que,

$K(T)$ – derivada em ordem ao tempo do parâmetro de reação à temperatura T

A – constante de proporcionalidade (1/s)

R – constante universal dos gases perfeitos (8.314 J/(mol K))

E_a – energia de ativação aparente do betão (J/mol)

À maturidade está sempre relacionado o conceito de idade equivalente t_{eq} . É a idade de um betão, com uma determinada maturidade e sob específicas condições de cura na obra, que corresponde à idade em que a referida maturidade seria atingida por esse betão, num ensaio isotérmico a uma temperatura de referência T_{ref} de 20°C. Logo, a expressão matemática para a idade equivalente é obtida a partir da seguinte igualdade.

$$\begin{aligned} M(t, T) &= M(t_{eq}, T_{ref}) \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \int_0^t K(T(\tau)) d\tau &= \int_0^{t_{eq}} K(T_{ref}) d\tau \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \int_0^t K(T(\tau)) d\tau &= K(T_{ref}) t_{eq} \Leftrightarrow t_{eq} = \frac{\int_0^t K(T(\tau)) d\tau}{K(T_{ref})} \end{aligned} \quad (2.44)$$

Atendendo à expressão (2.44) obtemos como expressão final para a idade equivalente:

$$t_{eq} = \int_0^t e^{-\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T(\tau)} - \frac{1}{T_{ref}} \right)} d\tau \quad (2.45)$$

O método da idade equivalente permite uma análise mais rigorosa, porque também tem em consideração a variação de temperaturas no betão em conformidade com o grau de hidratação. Sendo esta a principal razão de ser o método mais utilizado.

2.2.3.2. Propriedades mecânicas do betão em função da idade equivalente

À semelhança do método anteriormente apresentado, a idade equivalente permite também estimar algumas propriedades mecânicas do betão.

$$X_i(t_{eq}) = X_{28} \beta_{cc}(t_{eq})^\alpha \quad (2.46)$$

$$\beta_{cc}(t_{eq}) = e^{s \left(1 - \sqrt{\frac{28}{t_{eq}}} \right)} \quad (2.47)$$

em que,

$X_i(t_{eq})$ – propriedade mecânica em análise para a idade equivalente t_{eq}

X_{28} – valor da propriedade mecânica em análise aos 28 dias

α – parâmetro sugerido pelo EC2 (assume diferentes valores)

$\beta_{cc}(t_{eq})$ – coeficiente que depende da idade equivalente do betão

s – parâmetro que depende do tipo de cimento usado. Para cimentos normais da “Classe N” assume o valor de 0.25

Adaptando as expressões (2.46) e (2.47) às diferentes propriedades mecânicas obtemos a resistência à compressão $f_c(t_{eq})$, o módulo de elasticidade $E_c(t_{eq})$ e a resistência à tração $f_{ct}(t_{eq})$ em função da idade equivalente do betão:

$$f_c(t_{eq}) = f_{c28} \left[e^{s \left(1 - \sqrt{\frac{28}{t_{eq}}} \right)} \right]^1 \quad (2.48)$$

$$E_c(t_{eq}) = E_{c28} \left[e^{s \left(1 - \sqrt{\frac{28}{t_{eq}}} \right)} \right]^{0.3} \quad (2.49)$$

$$f_{ct}(t_{eq}) = f_{ct28} \left[e^{s \left(1 - \sqrt{\frac{28}{t_{eq}}} \right)} \right]^\alpha \quad (2.50)$$

Relativamente à resistência à tração, o valor α pode assumir os valores 1 ou 2/3 para $t < 28$ dias e $t \geq 28$ dias, respetivamente.

A Fig.2.5 traduz o crescimento das propriedades mecânicas em análise, de acordo com a idade equivalente. O módulo de elasticidade é a propriedade evolui mais rapidamente, seguido da resistência à tração e da resistência à compressão, tal como verificado pelo método do grau de hidratação. Contudo, para este caso, todas as curvas assumem um crescimento exponencial.

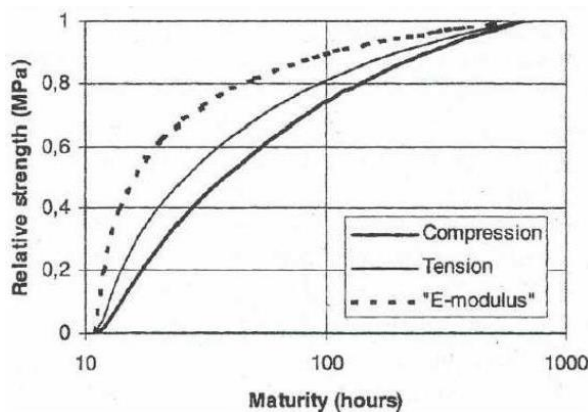


Fig.2.5 - Comparação da evolução das propriedades do betão: idade equivalente (Ji, 2008)

2.2.4. Fluência

2.2.4.1. FLUÊNCIA NAS PRIMEIRAS IDADES DO BETÃO

A fluência assume um papel muito importante na determinação das deformações, e respetivas tensões, nas primeiras idades do betão. O aumento de temperatura decorrente do calor de hidratação libertado implica o surgimento de tensões de origem térmica e potencia o aparecimento de fendas de forma prematura. No entanto, a fluência tem muitas vezes um papel preponderante na redução dessas tensões.

Este fenómeno é usualmente definido como o aumento de deformações sob tensão constante. Ao aplicar uma carga obtém-se uma deformação instantânea, sendo que se mantiver essa força aplicada durante um determinado período de tempo, obtém-se deformações crescentes ao longo do tempo, ou seja, deformações por fluência. Sabendo a função de fluência $J(t, t')$ é possível simular essas deformações através da expressão (2.51).

$$\varepsilon_{tot}(t, t') = J(t, t') \sigma(t') \quad (2.51)$$

em que,

$\varepsilon_{tot}(t, t')$ – extensão total no instante t para a idade de carregamento t'

$\sigma(t')$ – tensão aplicada no instante de carregamento t'

Nas primeiras idades o betão ainda não tem as suas propriedades mecânicas bem definidas, porque estas se encontram em evolução, tal como já foi demonstrado a partir das expressões do grau de hidratação e da idade equivalente. Esta evolução tende para um ganho de rigidez e endurecimento do betão. Como tal, as deformações de fluência são cada vez maiores, quanto menor for a idade de carregamento.

É também relevante referir que ao longo da hidratação vão se formando partículas de “gel” de cimento sob tensão nula, que aliviam as partículas anteriormente carregadas, de tal forma que se verifica uma redução das deformações por fluência (Azenha, M.Â.D., 2004).

É habitual a separação dos fenómenos de fluência em fluência básica e fluência de secagem. A fluência básica ocorre sem trocas de humidade com o ambiente. A fluência de secagem, também designada por efeito de “Pickett” (Altoubat, S.A. and Lange, D.A., 2001), é usualmente desprezada nas primeiras idades, porque apenas tem influência na zona superficial do betão. Tal situação é constatada principalmente em estruturas de betão em massa como barragens, que pelas suas dimensões determinam uma maior importância da fluência básica. Logo, no presente estudo é razoável desprezar a fluência de secagem e adotar um método matemático para simular o fenómeno em análise, que apenas tem a consideração a fluência básica.

2.2.4.2. Lei da Dupla Potência

A Lei da Dupla Potência também designada por Lei de Bazant-Panula (Bazant e Chern, 1985) é a mais usada para a simulação da fluência nas primeiras idades de betão.

$$J(t, t') = \frac{1}{E_0(t')} + \frac{\phi_l}{E_0(t')} ((t')^{-m} + \alpha_{DPL}) (t - t')^n \quad (2.52)$$

em que,

$E_0(t')$ – módulo de elasticidade assintótico (cargas de curta duração)

n – parâmetro com valor típico de 1/8

m – parâmetro com valor típico de 1/3

α_{DPL} – parâmetro com valor típico de 0.05

ϕ_l – parâmetro com valor típico entre 3e 6

t – idade do betão (dias)

t' – idade do carregamento (dias)

O valor de E_0 é dos parâmetros mais difíceis de estimar e influencia severamente os resultados obtidos por esta lei, porque separa a deformação instantânea inicial da deformação por fluência. O parâmetro α_{DPL} depende da relação água-cimento do betão. No entanto, no presente trabalho adotou-se um valor nulo para esse parâmetro, tal como em Silva, L.M.G.d., 2007, onde se verificou a partir de um estudo preliminar que este parâmetro tem um efeito desprezável. Os parâmetros ϕ_l , n e m têm em consideração a composição do betão, o tipo de cimento utilizado e a resistência à compressão, respetivamente (Silva, L.M.G.d., 2007). Estes parâmetros estão também condicionados pelo valor do módulo de elasticidade adotado e podem ser ajustados de forma a coincidirem com as curvas experimentais de fluência (se existiram para o caso em estudo).

Na implementação numérica da equação (2.52) e para casos de estudo do betão em idades jovens, ou seja, em períodos de análise relativamente curtos, é conveniente desenvolver a referida expressão numa série de Taylor. Deste modo, passa a ser possível calcular acréscimos de tensão e deformação em diferentes instantes atualizando nos sucessivos incrementos as propriedades mecânicas do betão.

A lei da dupla potência foi adotada em todas as análises mecânicas presentes no capítulo 5.

2.2.5. RETRAÇÃO

O betão “de per si” é capaz de sofrer deformações que não estão relacionadas com carregamentos ou variações de temperatura. A retração está diretamente ligada aos fenómenos de secagem (perda de água) e às reações internas devidas aos fenómenos de hidratação da pasta de cimento.

Existem três tipos de retração: retração autogénea, retração de secagem e retração de carbonatação. Esta última não assume um papel muito importante, mas pode ser definida como sendo uma retração que está diretamente ligada à interação entre o dióxido de carbono atmosférico e os produtos resultantes da hidratação do cimento, que determinam pequenas retrações no betão podendo provocar deterioração, corrosão das armaduras e também fissuração superficial, uma vez que apenas a superfície do betão se encontra em contacto com a atmosfera (Silva, L.M.G.d., 2007).

A retração de secagem implica uma redução do volume de betão devido à perda de água para o exterior. Este volume pode ser recuperável se o betão estiver novamente sujeito a ambientes bastante húmidos. Um provete de betão que esteja totalmente mergulhado em água não sofre retração por secagem, porque não perde água para o ambiente envolvente.

A retração autogénea é definida como a redução de volume do betão a temperatura constante e sem trocas de humidade com o meio ambiente (Barcelo, L. [et al.], 2005). Esta redução de volume deve-se a uma pressão negativa criada nos poros do betão causada pela reação de hidratação do cimento e pela redução de humidade relativa interna (Wang, Z. and Li, G., 2013). A retração autogénea é usualmente

repartida em retração química, que consiste na diferença entre o volume dos produtos resultantes da hidratação do cimento e o volume dos reagentes que lhes dão origem, e em retração por auto-dissecação que apenas diz respeito à perda de volume global da massa de cimento (Azenha, M.Â.D., 2004). As deformações por retração autogénea são diretamente influenciadas pelo tipo de cimento, aditivos utilizados, relação água-cimento, concentração em volume de agregados e temperatura do betão.

2.2.6. OUTRAS PROPRIEDADES MECÂNICAS

2.2.6.1. Coeficiente de Poisson

A consideração da evolução do coeficiente de Poisson ν durante a hidratação é relativamente recente. Atualmente assume-se que este coeficiente varie entre os valores de 0.5 e 0.2, no início da hidratação e no final da hidratação, respetivamente.

A formulação apresentada pelos autores (De Schutter, G. and Kovler, K., 2003) pode ser adotada como uma lei de variação deste coeficiente ao longo da hidratação.

$$\nu(\alpha) = 0.18 \operatorname{sen}\left(\frac{\pi}{2}\alpha\right) + 0.5 e^{-10\alpha} \quad (2.53)$$

2.2.6.2. Coeficiente de dilatação térmica

O coeficiente de dilatação térmica também varia durante a hidratação. Inicialmente é mais elevado, porque o comportamento do betão é dominado pela água (valores próximos de $20 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$). Por volta dos 6 dias atinge valores inferiores na ordem dos $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ (Bjontegaard, O. and Sellevold, E.J., 2003) sendo que posteriormente sobe para valores correntemente utilizados para o betão endurecido, na ordem dos $12 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$.

Como a variação deste coeficiente se faz sentir essencialmente nas primeiras horas e a sua determinação exata é relativamente difícil, é consensual a utilização de um valor constante.

$$\alpha_{cT}(t) = \alpha_{cT}(\text{betão endurecido}) \quad (2.54)$$

3

METODOLOGIAS DE CONSTRUÇÃO DE ESTRUTURAS COM GRANDES MASSAS DE BETÃO

3.1. INTRODUÇÃO

As metodologias de construção adotadas em obras de betão em massa, como as barragens, refletem diretamente nas condições iniciais da estrutura e condicionam o comportamento térmico do betão nas primeiras idades. Contudo, é possível controlar a temperatura do betão durante a betonagem, e posteriormente a esta, adotando diferentes soluções.

O betão é um material com baixa condutibilidade térmica, o que implica que o calor gerado devido à reação de hidratação do cimento demora muito tempo a dissipar. Por vezes é necessário minimizar o calor gerado e/ou acelerar esse processo recorrendo a determinadas técnicas. As variações de volume nas primeiras idades são muito significativas devido ao aumento de temperatura interna do betão, como tal é necessário adotar métodos de construção que assegurem a não fissuração do betão nas primeiras idades.

Em elementos de baixa espessura, a dissipação de calor é quase tão rápida como a sua geração. No entanto, em secções de betão mais espessas, o calor dissipa mais lentamente do que é gerado, o que resulta em elevações de temperaturas significativas. Como tal, em estruturas de betão em massa é necessário estudar a localização das juntas, a adoção de determinados ritmos de betonagem, de técnicas de controlo de temperaturas e, em casos mais sensíveis, é necessário atender aos tipos de cofragem e tempos de descofragem.

3.2. MÉTODOS CONSTRUTIVOS

3.2.1. RITMOS DE BETONAGEM

Os ritmos de betonagem são condicionados pela altura das camadas, bem como o tempo de espera entre a sua colocação. Obviamente que estas variáveis podem ser condicionadas pela quantidade de cimento utilizada, as dimensões da barragem e pela realização ou não do controlo de temperaturas (Silveira, A.F.d., 1961). O betão utilizado no núcleo das barragens é geralmente muito pobre em cimento, mas o betão utilizado num pilar de descarregador de cheias é bastante rico em cimento, devido às propriedades mecânicas que este tem que adquirir. Logo, em estruturas deste tipo o controlo do ritmo de betonagem é também muito importante, já que, apesar dos volumes de betão serem mais reduzidos do que numa barragem, o elevado teor de cimento poderá condicionar severamente o processo construtivo.

As elevações de temperatura podem ser obtidas utilizando programas de cálculo adequados, ou então, utilizando o método de Schmidt em fluxo unidirecional, bidirecional ou tridimensional (Silveira, A.F.d., 1961). A necessidade de considerar o fluxo em diferentes direções depende essencialmente das características geométricas do elemento estrutural em estudo.

Se o elemento de betão em estudo tiver grande espessura, é razoável considerar que a perda de calor se faz essencialmente pela face superior da camada, enquanto não lhe é sobreposta uma nova camada. Logo, para este caso é lícito considerar-se que a transmissão de calor ocorre através de um fluxo unidirecional. Em casos em que a espessura do elemento estrutural é no máximo 5m (Silveira, A.F.d., 1961), a perda de calor pelas faces laterais é significativa, como tal é necessário considerar o fluxo de calor bidirecional ou mesmo tridimensional.

A experiência na Europa e nos E.U.A determinou o uso de camadas de 1.5 m de espessura com um tempo de espera de cerca de 5 dias (Silveira, A.F.d., 1961). Porém o ritmo de betonagem poderá variar conforme o caso em questão.

O importante é garantir que o intervalo de tempo adotado permita que no momento da betonagem da camada seguinte, a temperatura máxima atingida pela anterior já tenha ocorrido. Caso o intervalo de colocação não seja o mais acertado, a nova camada poderá estar a ser colocada antes da anterior atingir a temperatura máxima o que levará a temperaturas finais ainda mais elevadas, conduzindo a maiores tempos de arrefecimento do betão e a maiores valores para as tensões de origem térmica.

Por outro lado, se adotarem elevados tempos de espera entre camadas, no momento da betonagem da seguinte camada vão surgir elevados gradientes térmicos devido à diferença de temperaturas entre camadas, conduzindo deste modo ao aparecimento de fendas de forma prematura. Para além deste facto estão associados os prazos em obra que aumentam inconvenientemente.

Logo, é necessário um estudo adequado e por vezes iterativo, de forma a descobrir o melhor ritmo de betonagem para o caso em estudo.

3.2.2. TIPOS DE COFRAGEM

De um modo geral as cofragens mais utilizadas são de madeira ou de aço. A decisão de optar por um destes tipos de cofragem não pode ser aleatória, porque são materiais com características muito distintas, que influenciam o campo térmico do betão.

As cofragens de madeira funcionam praticamente como um isolante térmico, uma vez que a sua condutibilidade térmica é bastante inferior à do betão (ver Tabela 2). Este efeito poderá ser inconveniente, pois dificulta a dissipação do calor de hidratação do ligante. No momento da descofragem, os gradientes térmicos entre a temperatura do betão e do ar poderão ser excessivamente elevados, e consequentemente determinar o aparecimento de fendas em idades prematuras.

As cofragens acabam por ser retiradas nos primeiros dias, precisamente quando o betão atinge temperaturas muito elevadas devido às reações químicas associadas à hidratação. De modo a evitar estes problemas é aconselhável adotar uma de duas estratégias, ou se opta por retirar a cofragem muito cedo, antes do betão atingir temperaturas muito elevadas, ou então retirar a cofragem o mais tarde possível (Silveira, A.F.d., 1961). Qualquer uma das opções depende sempre das circunstâncias em obra.

A utilização de cofragens em aço também implica a geração de gradientes térmicos consideráveis, já que a sua condutibilidade é muito superior à do betão (ver Tabela 2). Ao contrário da madeira, em que o problema está no momento da descofragem, os gradientes térmicos com cofragens de aço ou com

outro tipo de metal ocorrem precisamente enquanto este está cofrado, uma vez que este material permite transferências de calor com o ar com grande facilidade.

Por vezes o gradiente térmico entre a temperatura ambiente e a temperatura do betão é tão elevado, que requer a utilização de cofragens muito espessas de madeira convencional, ou até mesmo cofragens constituídas por um material mais isolante, como por exemplo a cortiça (Silveira, A.F.d., 1961).

Tabela 2 - Condutibilidade térmica de diferentes materiais (Silveira, A.P.C.d., 1996)

	Betão	Madeira	Aço	Cortiça
$k \text{ (W.m}^{-1}\text{.K}^{-1}\text{)}$	1.2 – 2.4	0.12 – 0.23	60	0.045 – 0.1

3.2.3. ESPAÇAMENTO ENTRE JUNTAS

A colocação de juntas é ditada pela necessidade de aliviar a restrição às deformações originadas pelo abaixamento de temperatura da massa de betão. No entanto, a sua colocação exige um conhecimento da grandeza e da direção das maiores tensões de tração devidas às variações térmicas do betão. À partida deverão estar colocadas na direção normal a essas tensões, de forma a garantir os movimentos de dilatação e contração do betão necessários, sem ocorrer danificação estrutural.

Em barragens é consensual adotar 15m como espaçamento máximo entre juntas para zonas em que não seja controlada a temperatura do betão (Silveira, A.F.d., 1961). No entanto, em situações de utilização de sistemas de arrefecimento e controlo adequado de temperaturas, é possível adotar afastamentos entre juntas até valores triplos ao anteriormente enunciado.

Depois de a estrutura estar construída, a fase crítica do processo de hidratação do cimento estar consumada, e após o arrefecimento e estabilização do campo de temperaturas, as variações térmicas no betão são mais reduzidas pois a onda térmica anual não penetra no núcleo das obras de betão em massa. Logo, é conclusivo que a disposição das juntas em barragens está fortemente condiciona pelo comportamento térmico do betão nas primeiras idades.

É importante referir que também existem outros fatores que condicionam a colocação de juntas, tais como, outras obras que estejam ligadas à barragem, natureza da fundação, perfil do vale e ainda a altura, espessura e tipo de barragem em questão (Critchell, P.L., 1968).

3.2.4. CONTROLO DA TEMPERATURA DO BETÃO

Recorrer a métodos de controlo da temperatura do betão pode ser uma boa solução quando há necessidade em adotar obrigatoriamente um ritmo de betonagem muito rápido. Os métodos podem variar entre soluções económicas e soluções dispendiosas. As soluções mais correntes para o controlo das temperaturas atingidas pelo betão consistem no arrefecimento prévio dos seus constituintes e na utilização de aditivos na pasta de cimento.

Também é possível adotar métodos de pós-refrigeração, que consistem no arrefecimento artificial do betão posteriormente à betonagem, sendo que estas técnicas permitem diminuir o período de arrefecimento.

O período de arrefecimento do betão é muitas vezes condicionado pela necessidade de proceder à injeção de juntas, uma vez que estas só deverão ser aplicadas quando o betão já tiver arrefecido.

3.2.4.1 Arrefecimento dos constituintes de betão

O arrefecimento prévio dos constituintes do betão é um método de pré-refrigeração muito utilizado em obra. A temperatura dos constituintes está severamente condicionada pelas condições climáticas e pela radiação solar, pelo que é necessário garantir que aqueles se encontram devidamente protegidos, de modo a reduzir a temperatura do betão fresco.

A pasta de ligante atinge temperaturas muito elevadas, sendo estas mais significativas quanto maior for a quantidade de cimento. É necessário ter em consideração que o ligante representa uma parcela pequena da massa total do betão, já que grande percentagem da sua massa é constituída essencialmente pelos agregados, cerca de 70 a 85% (Gajda, J. and Vangeem, M., 2002).

Uma rápida demonstração observada em (Silveira, A.F.d., 1961) permite verificar que o processo mais eficaz consiste no arrefecimento da água e dos agregados.

Se os agregados estiverem bem protegidos a sua temperatura é considerada igual à temperatura ambiente, sendo que nas alturas de maior calor é possível regar os silos de agregados com água. No entanto, esta solução não é universal, porque as condições em obra podem não a permitir. Logo, existem diversos métodos para a refrigeração dos agregados do betão, sendo que os designados abaixo encontram-se expostos na referência bibliográfica (Silva, J.M.R.M.d., 2013):

- Utilização de coberturas, de modo a manter os inertes à temperatura ambiente. Sendo também a utilização de silos enterrados uma boa solução.
- Mergulhar os agregados em tanques de água fria a temperaturas próximas dos 0°C durante um determinado tempo, sendo posteriormente escorridas.
- Arrefecimento dos silos e tolvas de inertes através de injeção de ar frio ascendente (aproximadamente à temperatura de 2°C).

Outra estratégia consiste em substituir parte da água da amassadura por gelo moído. No entanto, é necessário garantir que o gelo tem tempo suficiente para fundir durante a operação de amassadura. Caso se verifique que o gelo não funda durante a amassadura, é preciso calcular o tempo de amassadura necessário para que isso aconteça (Silveira, A.F.d., 1961).

Porém, mesmo adotando estas técnicas é necessário garantir as precauções necessárias para evitar o aquecimento do betão durante a amassadura e após a colocação. Em obras de grandes dimensões o betão fresco quando sai da betoneira não é imediatamente colocado no seu destino final. Normalmente é colocado na obra em volumes pequenos e camadas de espessura reduzida (50cm), que podem ficar durante várias horas expostas ao ar e à radiação solar (Silveira, A.F.d., 1961).

3.2.4.2 Arrefecimento artificial do betão

A utilização de um processo de arrefecimento artificial é consequente da necessidade de arrefecer o betão rapidamente após a betonagem.

A utilização de uma rede de tubos embebidos no betão, também designada por serpentinas de refrigeração, é uma solução corrente para o arrefecimento do betão. Estes tubos estão dispostos de forma horizontal e geralmente colocados no topo de cada camada à razão de uma serpentina por camada (Silveira, A.F.d., 1961). Os tubos que constituem a serpentina deverão ser de baixa espessura e metálicos, de forma a facilitar as trocas de calor com o betão. Numa secção em corte é possível determinar que a área de influência de um tubo tem um formato hexagonal, devido à forma do tubo que constitui a serpentina e à existência de outras serpentinas acima e abaixo desta (ver Fig.3.1).

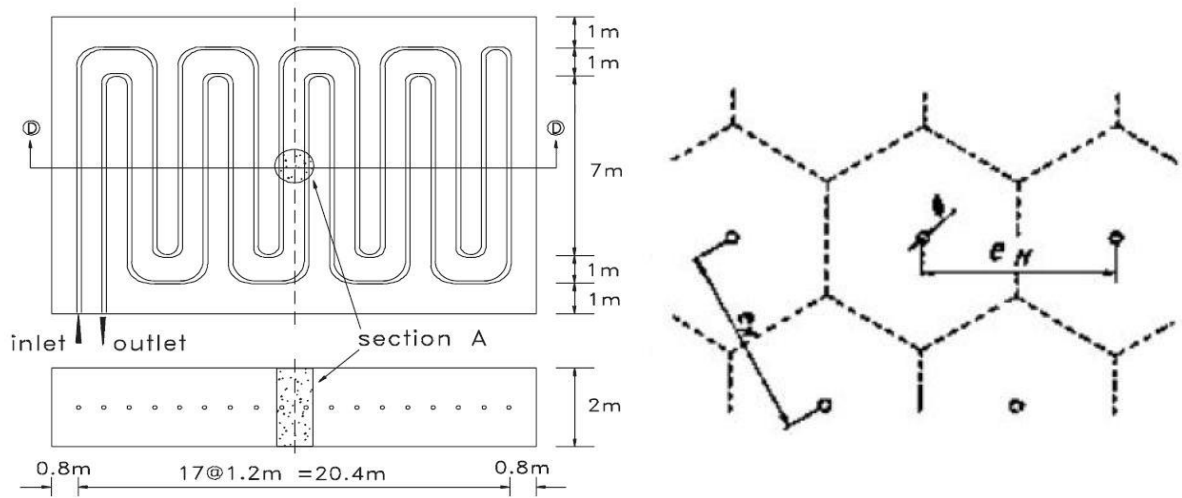


Fig.3.1 - Exemplo da distribuição de uma serpentina de refrigeração (esquerda) (Kim, J.K. [et al.], 2001) e da área de influência arrefecida por um tubo (direita) (Derron, A.S.M., 1957)

O processo de arrefecimento inerente a esta técnica consiste num princípio de conservação de energia para calcular a temperatura da água que circula no tubo em cada ponto. A conservação de energia baseia-se numa igualdade entre o calor fornecido ao tubo e o calor absorvido pela água que circula neste.

O calor fornecido ao tubo por unidade de tempo é calculado de acordo com a lei de refrigeração de Newton (Kim, J.K. [et al.], 2001).

$$q_{supply} = h_w A_w (T_{s,average} - T_{w,average}) = h_w (\pi D l) \left(\frac{T_{s,in} + T_{s,out}}{2} - \frac{T_{w,in} + T_{w,out}}{2} \right) \quad (3.1)$$

em que,

h_w – coeficiente de convecção do tubo com a água circulante

A_w – área da superfície do tubo

D – diâmetro do tubo

l – distância entre a entrada e a saída de água no segmento de tubo

$T_{w,in}$ e $T_{w,out}$ – temperatura de entrada e saída da água de refrigeração

$T_{s,in}$ e $T_{s,out}$ – temperatura de entrada e saída do tubo

O calor retirado pela água por unidade de tempo q_{cool} é designado pelo saldo entre o calor de entrada no tubo $q_{cool,in}$ e o calor que sai deste $q_{cool,out}$.

$$q_{cool} = q_{cool,out} - q_{cool,in} = Q_w \rho_w c_w (T_{w,out} - T_{w,in}) \quad (3.2)$$

em que,

Q_w – caudal que circula no interior da serpentina

ρ_w – peso volúmico da água

c_w – calor específico da água

De acordo com a lei de conservação de energia anteriormente exposta e sabendo os valores das temperaturas $T_{s,in}$, $T_{s,out}$ e $T_{w,in}$ facilmente se retira a incógnita que falta $T_{w,out}$.

$$T_{w,out} = \frac{(C_1 - C_2)T_{w,in} + C_2(T_{s,in} + T_{s,out})}{(C_1 + C_2)} \quad (3.3)$$

em que,

$$C_1 = Q_w \rho_w c_w \quad (3.4)$$

$$C_2 = h_w \pi D l / 2 \quad (3.5)$$

A Fig.3.2 permite observar de forma esquemática a lei de conservação de energia num troço do tubo que constitui a serpentina.

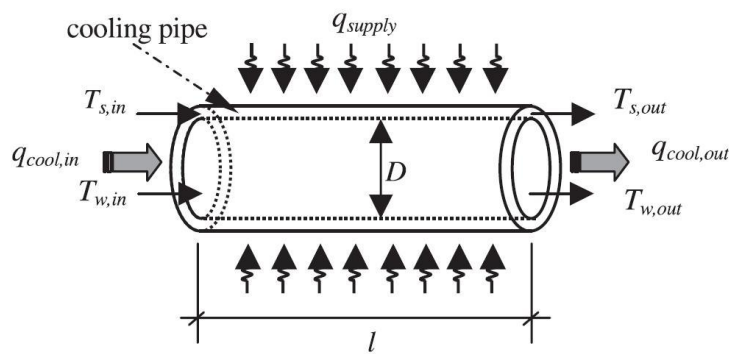


Fig.3.2 - Princípio de conservação de energia no tubo (Kim, J.K. [et al.], 2001)

A aplicação das diferentes equações expostas, bem como um estudo mais aprofundado dos seus pressupostos encontram-se na referência (Kim, J.K. [et al.], 2001).

É necessário ter em consideração que qualquer sistema de pós-refrigeração deverá garantir que não ocorram variações térmicas muito elevadas com capacidade para provocar elevadas tensões no betão e consequentemente o aparecimento de fendas. Posteriormente ao arrefecimento artificial do betão o processo de libertação de calor continua, mas desta vez de forma natural até ao equilíbrio térmico com a temperatura ambiente.

3.3 ESPECIFICAÇÕES DE PROJETO

De modo a entender as especificações de projeto em estruturas deste tipo, é necessário atender à verdadeira definição de betão em massa. De acordo com outras referências (ACI Committee 166, 1967), betão em massa pode ser definido como, qualquer volume de betão com dimensões suficientemente grandes, em que seja necessário tomar medidas para o controlo do calor gerado pela hidratação do cimento e das variações volumétricas associadas, de modo a minimizar o risco de fendilhação em idades prematuras.

Esta definição acaba por ser muito vaga, já que não fornece dimensões específicas para estes volumes de betão. Como tal, muitas vezes opta-se por criar uma definição mais específica. Deste modo, acabam por existir várias definições, mais práticas, de betão em massa. De acordo com (Gajda, J. and Vangeem, M., 2002) estas definições tendem a estipular um valor para a menor dimensão do betão, como por exemplo: qualquer elemento de betão, em que a menor dimensão seja superior a 0.9m, é considerado um volume de betão em massa. Este valor pode alterar conforme a experiência podendo variar entre 0.46 e 2m.

Normalmente, de acordo com as especificações do projeto são limitadas as temperaturas atingidas pelo betão, de modo a garantir uma boa durabilidade da estrutura. Geralmente são tidos em consideração valores indicativos para a temperatura máxima atingida pelo betão e para o diferencial entre a temperatura no centro e na face no betão, 57°C e 19°C respetivamente (Gajda, J. and Vangeem, M., 2002).

É comum também adotar limites máximos e mínimos para a temperatura inicial do betão.

3.3.1. TEMPERATURA MÁXIMA DO BETÃO

A limitação da temperatura máxima do betão existe por diversas razões. Vários estudos foram elaborados no âmbito deste problema, em que se concluiu que a durabilidade da estrutura poderá estar comprometida, se a máxima temperatura atingida pelo betão exceder 70°C (Taylor, H. [et al.], 2001).

Ao atingir temperaturas muito elevadas nas primeiras idades, é possível a ocorrência de um fenómeno denominado por formação retardada de etringite. O aparecimento de cristais de etringite poderá provocar uma expansão interna do betão e consequentemente o aparecimento de fendas em idades mais avançadas, que só são verificadas passados alguns anos.

Uma outra razão para a limitação desta temperatura está diretamente relacionada com a redução do tempo necessário para o arrefecimento do betão, e minimização da probabilidade de aparecimento de fendas devido a fenómenos de expansão térmica e posterior retração aquando do arrefecimento.

3.3.2. TEMPERATURA DIFERENCIAL MÁXIMA

Esta restrição consiste em impor um limite máximo para a diferença entre a temperatura no ponto mais quente do betão e a temperatura à superfície deste. É importante estabelecer este limite porque poderão aparecer fendas quando ocorrer retração do betão à superfície, devido ao seu arrefecimento mais rápido, provocando deste modo a geração de tensões iguais à resistência à tração do betão.

A título de exemplo, é costume utilizar 19°C para esta diferença máxima entre temperaturas. Contudo, este valor pode ser muito restritivo, porque a fendilhação poderá ocorrer para valores de temperaturas diferenciais inferiores a 19°C (Gajda, J. and Vangeem, M., 2002).

O valor máximo da diferença entre a temperatura máxima e a temperatura na superfície do betão depende das propriedades mecânicas deste, tais como, o módulo de elasticidade, o coeficiente de dilatação térmica e a resistência à tração, como também do tamanho e das restrições do elemento de betão. Quando as propriedades do betão começam a estabilizar, este limite máximo poderá ser muito superior a 19°C (Gajda, J. and Vangeem, M., 2002).

Logo, o estudo mais aprofundado relativamente a este limite diferencial de temperaturas poderá permitir reduzir o tempo necessário do uso de medidas de proteção (redução do tempo de utilização de cofragens e/ou mantas nos topos das camadas de betão).

4

ANÁLISES TÉRMICAS - ESTUDO PARAMÉTRICO

4.1. INTRODUÇÃO

No presente capítulo são apresentadas diferentes análises térmicas com o intuito de permitir adquirir alguma sensibilidade relativamente às variáveis que mais condicionam a evolução do campo de temperaturas do betão durante a fase construtiva. Para o efeito foi desenvolvido um estudo paramétrico contemplando várias análises, nas quais se variaram parâmetros como a temperatura de colocação do betão, a dosagem de ligante, a temperatura ambiente, a radiação solar, os dias de espera entre betonagem de camadas consecutivas e as alturas de betonagem das camadas.

Para além do acima exposto, o objetivo deste estudo é a compreensão dos fenómenos envolvidos num caso simples, de forma a conseguir tomar as melhores opções de projeto e avaliar o rigor que é necessário na modelação. A partir destas conclusões pretende-se tomar as melhores opções na elaboração do modelo final do pilar de descarregador de cheias.

4.2. TABELA DE ANÁLISES TÉRMICAS

Neste capítulo são apresentadas as diversas análises térmicas concretizadas no âmbito do estudo do comportamento do betão. Para cada uma destas análises são apresentadas as temperaturas calculadas nos nós da malha de elementos finitos (ver Fig.4.1). Todas as análises apresentadas neste capítulo tiveram como alvo o estudo de três nós da terceira camada de betão (camada a vermelho da Fig.4.2), referentes ao topo (nó 28), meio (nó 204) e base da camada (nó 17).

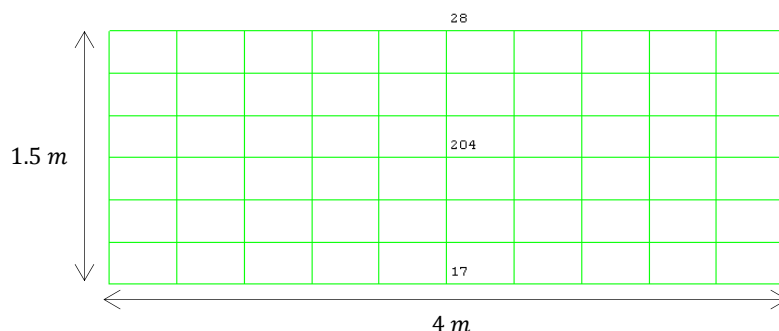


Fig.4.1 - Nós da malha de elementos finitos em análise (nó 28, 204 e 17)

Os resultados obtidos nas análises apresentadas na Tabela 3 foram enquadrados nos subcapítulos correspondentes, de acordo com o tema em que melhor se inserem. A análise base apresenta um maior destaque na Tabela 3, porque é a análise de referência a partir do qual foram elaborados os estudos paramétricos.

Tabela 3 - Análises térmicas

Análise	$e_{camadas}$ (m)	t_{espera} (dias)	$T_{ambiente}$ (°C)	$T_{betão}$ (°C)	Dosagem de ligante (kg/m ³)	h_{cr} (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)
BASE	1.5	3	18	15	370	16.5
BASE_5D	1.5	5	18	15	370	
BASE_7D		7				
BASE_2m	2	3	18	15	370	
BASE_2m_5D		5				
BASE_2m_7D		7				
BASE_Tb10	1.5	3	18	10	370	
BASE_300	1.5	3	18	15	300	
BASE_10%Cinzas	1.5	3	18	15	370 (10% cinzas)	
BASE_30%Cinzas					370 (30% cinzas)	
BASE_Verão	1.5	3	30	15	370	
BASE_Inverno			5	10		
BASE_SinVerão	1.5	3	Sinusoide Verão	15	370	
BASE_SinInverno			Sinusoide Inverno	10		
BASE_SinVerão_qs1	1.5	3	Sinusoide Verão e radiação solar (céu limpo)	15	370	
BASE_SinVerão_qs2			Sinusoide Verão e radiação solar (céu nublado)			
BASE_SinInverno_qs3			Sinusoide Inverno e radiação solar (céu limpo)	10		
BASE_SinInverno_qs4			Sinusoide Inverno e radiação solar (céu nublado)			
BASE_Rad	1.5	3	18	15	370	21.6
BASE_7D_Rad		7				

4.3. MODELO BASE

O modelo base elaborado consiste numa opção padrão adotada, de modo a criar uma referência de comparação com os estudos paramétricos, que por sua vez vão permitir entender a influência isolada da variação de certos parâmetros.

A partir do *software* DIANA realizou-se um modelo 2D, caracterizado por uma geometria simples e pelas suas dimensões relativamente pequenas, de modo a simular o comportamento térmico das

camadas de betão mais interiores do pilar de descarregador de cheias. A partir da utilização deste modelo mais pequeno, com uma malha de elementos finitos mais reduzida, é possível acelerar o cálculo e a obtenção de resultados.

4.3.1. DISCRETIZAÇÃO DO MODELO

4.3.1.1. Caracterização da geometria

De forma a definir a geometria do modelo é necessário atender ao método construtivo. Para a elaboração do modelo base foi admitido um processo construtivo congruente com a betonagem de camadas de 1.5m de altura e 4m de largura, sendo esta a verdadeira largura do pilar de descarregador de cheias.

Na elaboração da geometria do modelo no *software* DIANA considerou-se a existência de 5 camadas. A terceira camada foi a escolhida para uma análise mais detalhada (ver Fig.4.1), visto que esta é a mais representativa para a análise da propagação do fluxo de calor.

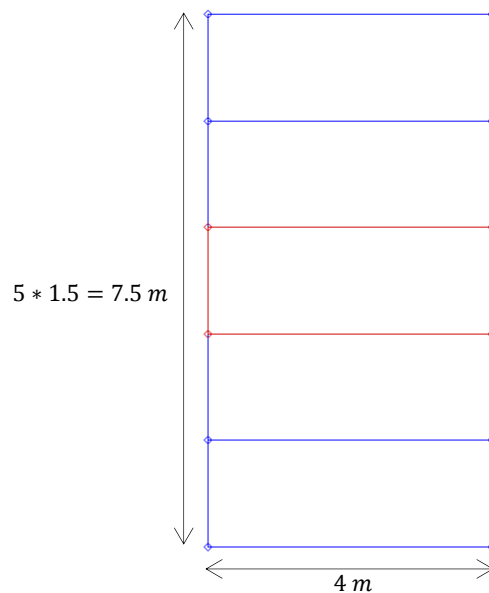


Fig.4.2 - Geometria do modelo base e camada em análise (vermelho)

4.3.1.2. Condições fronteira

Nas diferentes análises térmicas elaboradas neste modelo assumiu-se a existência de apenas uma superfície em que ocorre transmissão de calor por convecção. Deste modo, atendendo à expressão (2.19) foi definido para a superfície superior de cada camada um coeficiente de convecção, em conformidade com a velocidade média do vento para o local em questão.

$$v = 10 \text{ km/h} \rightarrow h_c = 16.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \quad (4.1)$$

Nas restantes fronteiras do modelo considerou-se a existência de superfícies adiabáticas. Visto que se está a analisar apenas o comportamento térmico do betão nas primeiras idades esta decisão é razoável, e consequentemente levará à existência de um fluxo de calor unidirecional, no sentido ascendente.

A transmissão de calor por radiação não foi considerada neste modelo base, mas foi considerada nos estudos paramétricos de forma a avaliar a sua influência e importância para o caso de estudo.

4.3.1.3. Propriedades dos materiais

O betão especificado no pilar de descarregador de cheias é um C30/37 com 370 kg/m^3 de cimento (0% de adições). Esta dosagem é muito elevada para uma estrutura de betão com esta espessura, mas foi ainda assim adotada para a elaboração do modelo base. Foram admitidos valores para a densidade ρ e para a capacidade calorífica ρc , que juntamente com dados experimentais existentes para o calor de hidratação da pasta de cimento permitiram determinar a curva adiabática do betão representada na Fig.4.3. De modo a ter todas as propriedades necessárias para o cálculo térmico definiu-se a condutibilidade térmica k e ainda a constante de Arrhenius E_a/R (determinação da idade equivalente).

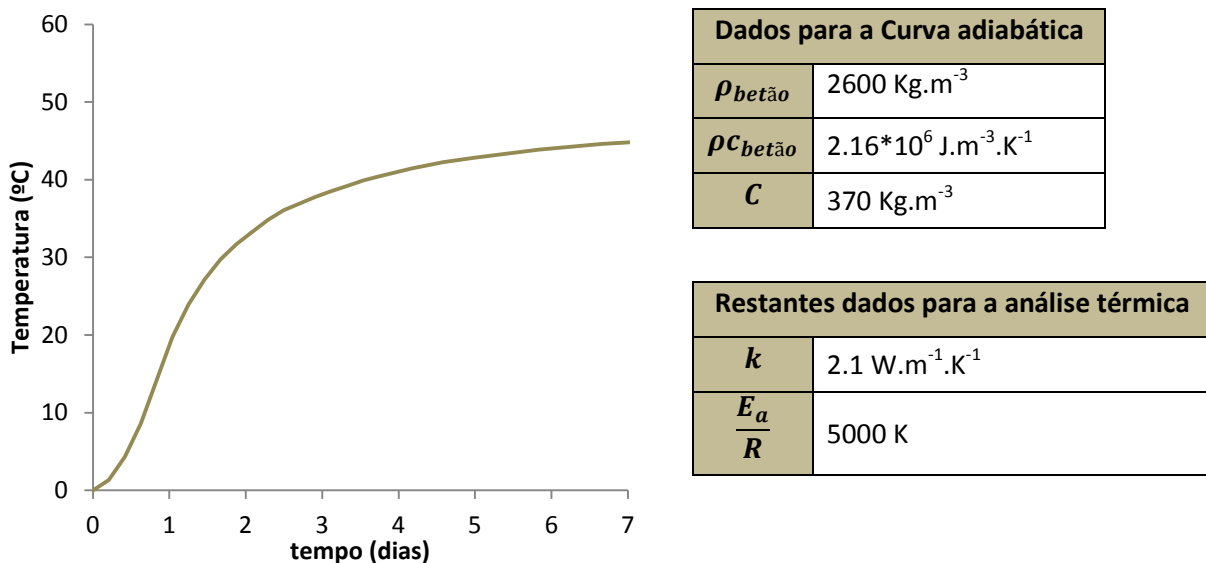


Fig.4.3 - Gráfico da curva adiabática do betão (370 Kg/m^3 de cimento) e dados para as análises térmicas

4.3.1.4. Malha de elementos finitos

A malha de elementos finitos definida é constituída por elementos de 2 nós (B2HT) nas superfícies convectivas e de 4 nós (Q4HT) nos elementos representativos da massa de betão.

Relativamente ao número de elementos utilizados no modelo, foi definido para cada camada uma divisão em 10 elementos finitos em largura, e de 6 elementos em altura. Com esta divisão facilmente analisamos o fluxo de temperatura nas camadas, nas zonas de maior importância.

A Fig.4.4 representa a malha de elementos finitos ao longo do processo construtivo, desde a betonagem da terceira camada. Nesta figura verifica-se que a camada em análise está a vermelho, as restantes camadas a verde e a localização dos elementos convetivos a azul, sendo que estes se encontram sempre no topo da última camada betonada.

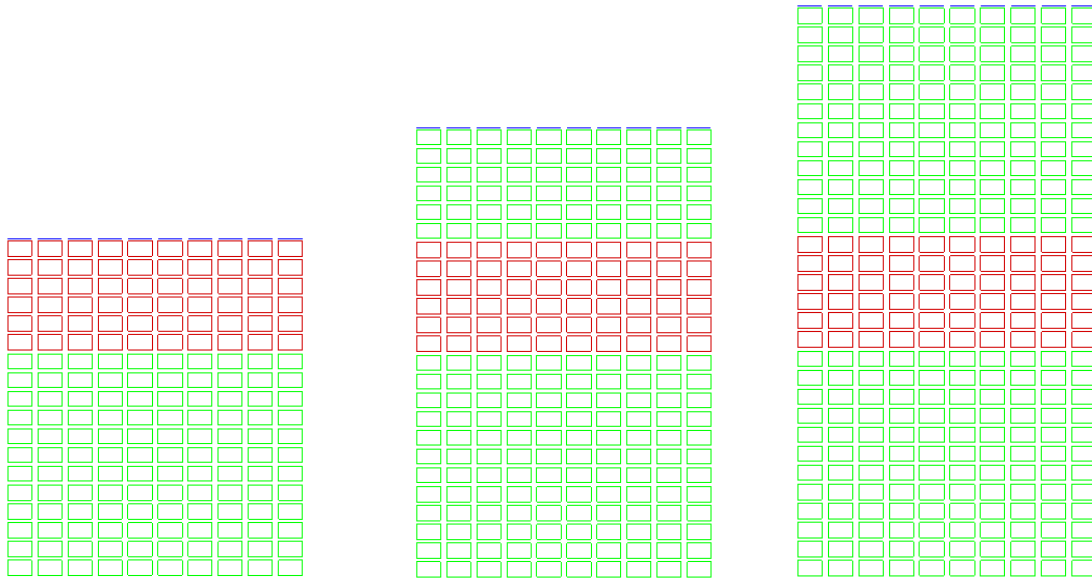


Fig.4.4 - Malha de elementos finitos de acordo com o faseamento construtivo (desde a terceira camada)

4.3.1.5. Análise Base

Tal como já foi referido anteriormente, de forma a obter resultados relativamente à variação de temperaturas no betão foram escolhidos três nós da malha, que representassem de forma genérica o campo de temperaturas (ver Fig.4.1). A análise base corresponde exatamente às condições descritas para o Modelo Base. Para esta análise foi considerada uma temperatura ambiente de 18°C , como sendo a temperatura média anual no local onde está a ser construída a barragem, na qual se está a estudar o campo térmico do pilar de descarregador de cheias. Adotou-se ainda 15°C como a temperatura de colocação do betão (ver Tabela 3).

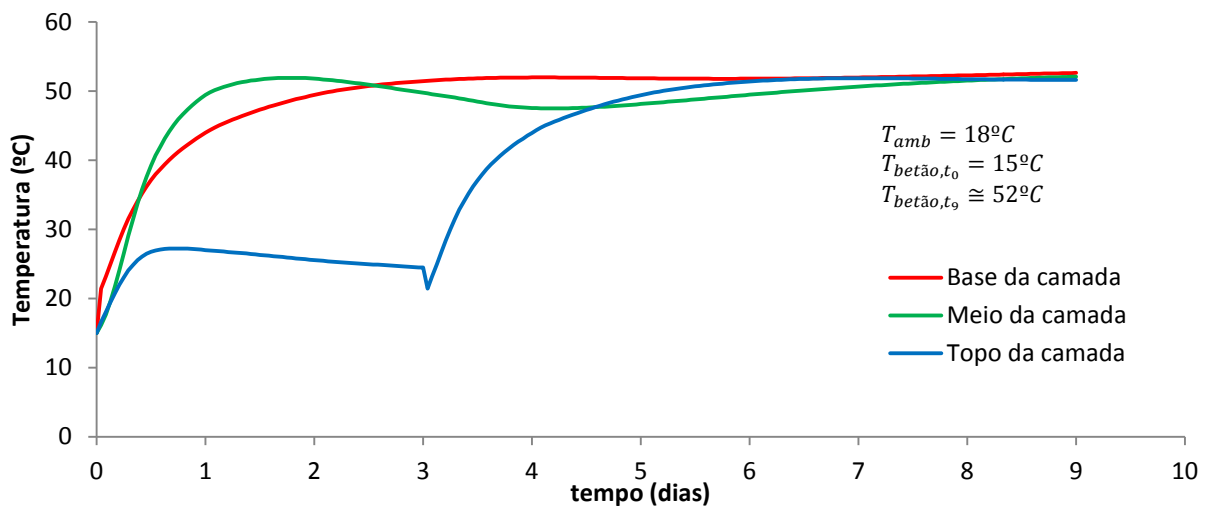


Fig.4.5 - Variação da temperatura no betão: Análise Base

Os gráficos correspondentes à Fig.4.5 permitem atender à variação do campo térmico em vários pontos do bloco de betão. Uma das mais visíveis conclusões é a estabilização da temperatura do betão aos 8 dias, no qual se atingem temperaturas na ordem dos 52°C .

Inicialmente, o gráfico referente à base da camada é o que cresce mais rapidamente, devido ao facto do betão estar em contacto com uma outra camada, betonada recentemente, que ainda se encontra a perder calor por condução. Sofre ainda um aumento de temperatura gradual até aos 3 dias, a partir do qual deixa de sofrer variações significativas, mesmo já contando com a betonagem de mais duas camadas de 1.5m de altura, aos 3 e 6 dias.

No topo da camada é de salientar a variação brusca de temperatura aos 3 dias, que surge devido à betonagem de uma nova camada a uma temperatura de 15°C. Posteriormente a essa variação, a fronteira de topo, deixa de perder calor por convecção (deixa de estar em contacto com o ar), ocorrendo apenas condução de calor que leva a uma elevação de temperatura gradual, que adquire graficamente um aspeto idêntico à curva referente à base da camada.

A curva referente a meio da camada assume uma grande importância em termos de análise do valor de temperatura de pico, bem como o dia em que este é atingido. O pico da temperatura é atingido por volta dos 1.5 dias e assume um valor semelhante à temperatura final da análise (52°C). A temperatura começa a baixar a partir dessa data, porque o betão deixa de gerar tanto calor, passando a ser mais significativa a dissipação de calor para o topo. No entanto, aos 4.5 dias a temperatura volta a aumentar. Tal situação acontece porque aos 3 dias se betona uma nova camada, que apenas passa a ter influência térmica nas fibras da camada do meio do betão, passados cerca de 1.5 dias, conduzindo este a uma nova elevação da temperatura.

Os gráficos da Fig.4.6 são referentes a uma análise que admite que não foram betonadas camadas posteriormente à camada em análise. Estes gráficos são importantes, porque permitem validar as conclusões anteriormente apresentadas acerca da influência da betonagem de mais duas camadas de betão aos 3 e 6 dias. Também é possível verificar que as temperaturas nas três zonas em análise tendem para valores inferiores ao longo da análise, porque não existem camadas adjacentes a serem betonadas.

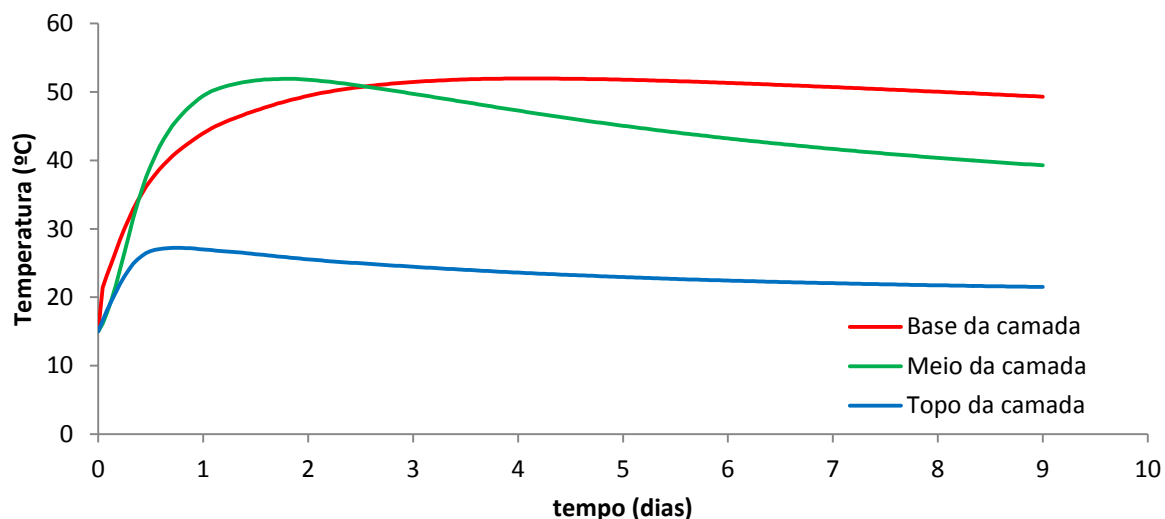


Fig.4.6 - Variação da temperatura no betão: última camada betonada

4.4. ESTUDOS PARAMÉTRICOS

Ao longo do presente capítulo serão apresentadas as conclusões acerca das restantes análises térmicas expostas na Tabela 3, com o intuito de avaliar a importância da variação de certos parâmetros.

4.4.1. INFLUÊNCIA DO PROCESSO CONSTRUTIVO

4.4.1.1. Tempo de espera entre camadas

São agora apresentados as conclusões ao nível de variações térmicas do betão referentes às análises BASE_5D e BASE_7D, que simulam tempos de espera de 5 e 7 dias de betonagem entre camadas, respetivamente.

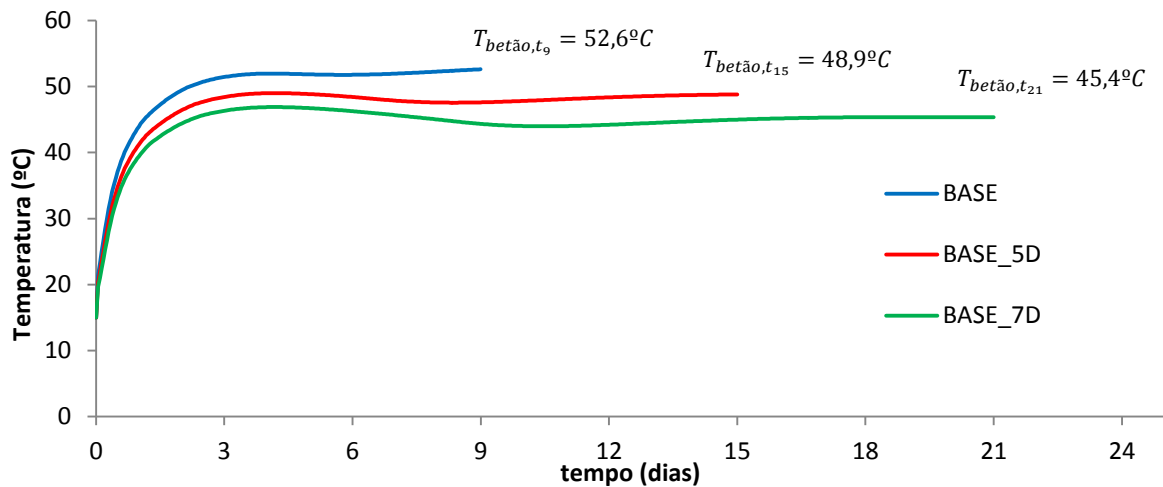


Fig.4.7 - Variação da temperatura no betão considerando diferentes tempos de espera: base da camada

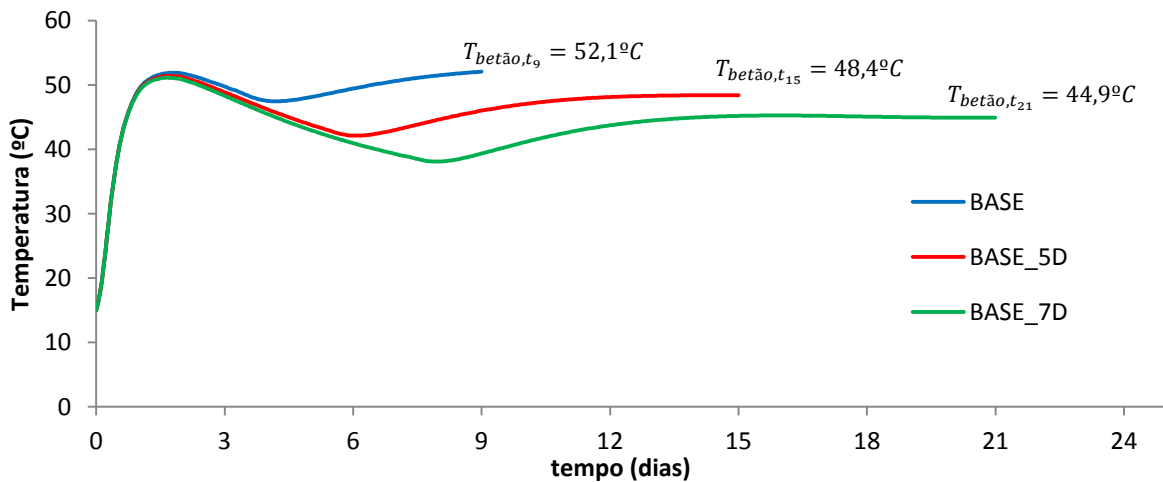


Fig.4.8 - Variação da temperatura no betão considerando diferentes tempos de espera: meio da camada

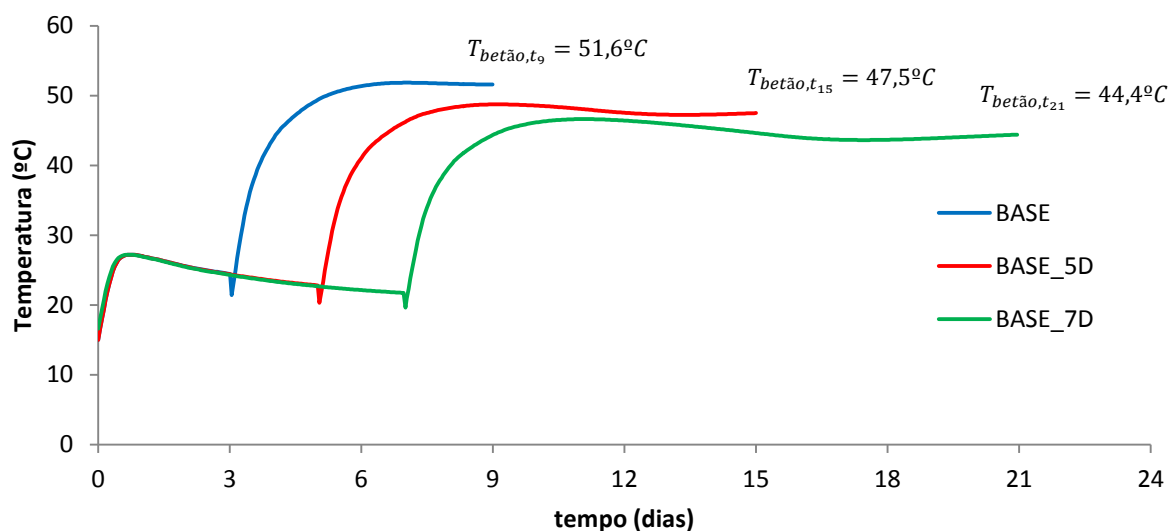


Fig.4.9 - Variação da temperatura no betão considerando diferentes tempos de espera: topo da camada

Analisando o betão na base da camada, Fig.4.7, verificamos que para maiores tempos de espera, a temperatura do betão é inferior. Tal acontece, porque a camada que estamos a estudar foi betonada por cima de uma já existente, em que se permitiu que esta dissipasse calor por convecção para o exterior durante um maior período de tempo, 5 ou 7 dias conforme a análise em estudo.

A partir dos gráficos da Fig.4.8 facilmente se interpreta que no meio da camada de betão, o tempo de espera entre betonagem de camadas, tem influência na temperatura registada no final de cada análise. Apresentando uma variação de cerca de 3,5°C a cada dois dias extra que se espera para betonar a camada seguinte. A temperatura de pico não sofre variação significativa (cerca de 52°C), pois ocorre sempre antes da betonagem da camada seguinte.

Os gráficos da Fig.4.9 apoiam precisamente o que foi referido para a Fig.4.7. Após a betonagem da seguinte camada, que poderá ocorrer passados 3, 5 ou 7 dias, verifica-se que a temperatura no topo da camada em análise é menor, quanto maior for o tempo de espera. Por consequência, as temperaturas registadas ao longo do gráfico serão sempre inferiores às verificadas para a Análise Base.

4.4.1.2. Espessura das camadas

Relativamente à análise BASE_2m obteve-se um resultado espectacular. Com camadas de maior espessura, a temperatura atingida pelo betão é superior nos diferentes pontos da camada de betão.

Os gráficos da Fig.4.10 a Fig.4.12 apresentam os resultados relativos à variação da temperatura do betão no topo, meio e base, no caso da betonagem de camadas de 2m de espessura.

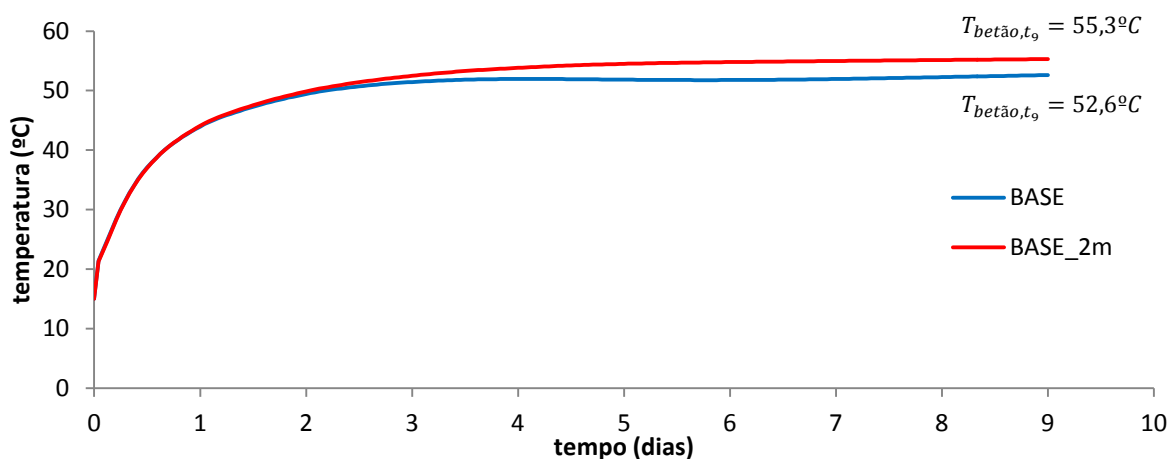


Fig.4.10 - Variação da temperatura no betão para diferentes espessuras das camadas: base da camada

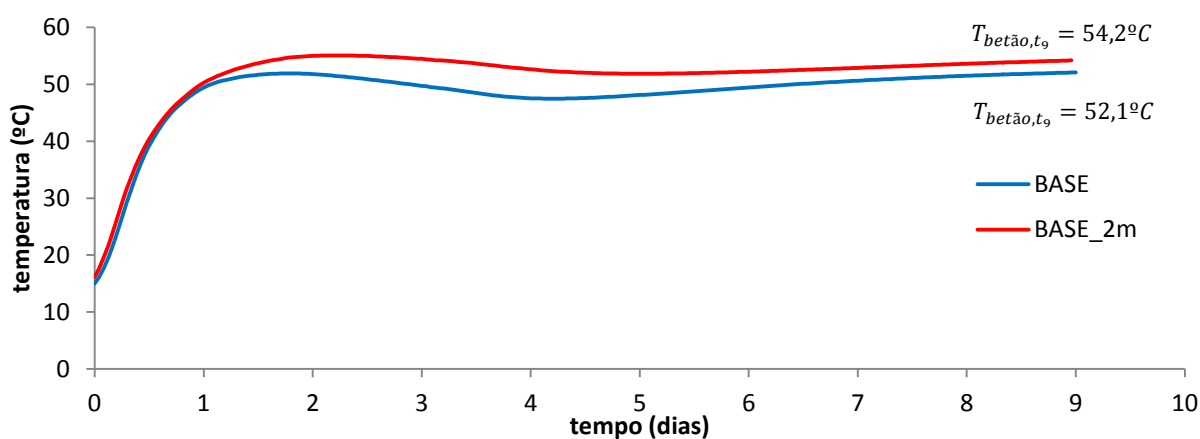


Fig.4.11 - Variação da temperatura no betão para diferentes espessuras de camadas: meio da camada

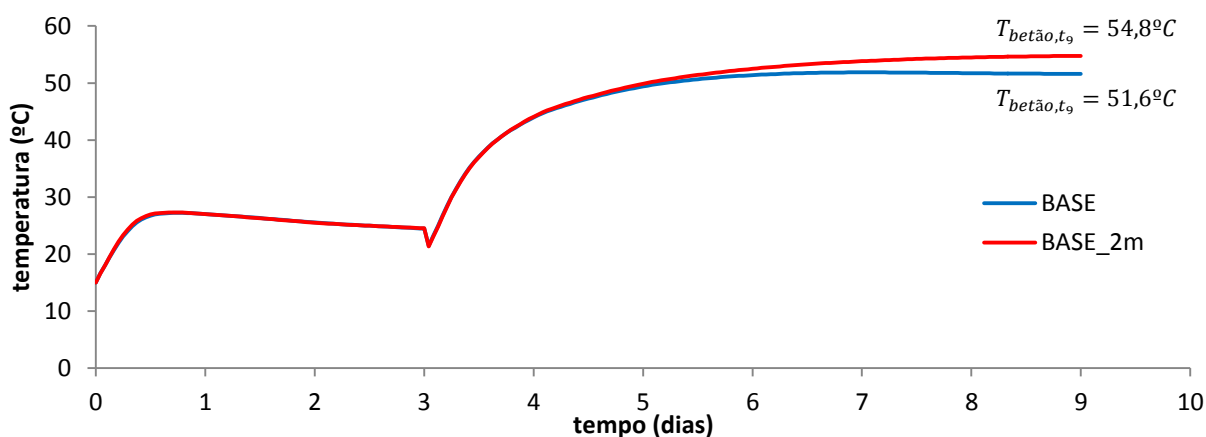


Fig.4.12 - Variação da temperatura no betão para diferentes espessuras das camadas: topo da camada

Para o nó situado a meio da camada, Fig.4.11, verifica-se para a análise BASE_2m uma temperatura de pico superior, atingida um pouco depois dos 2 dias. É de salientar que para além do pico de temperatura ser superior, este acontece mais tarde, quando comparado com a análise BASE. As temperaturas mantêm-se muito semelhantes até os 1.5 dias, sendo que posteriormente divergem.

Nos gráficos da Fig.4.10 referentes à base da camada constata-se que a temperaturas são idênticas até aos 3 dias em ambas as análises, sendo que a partir desse dia as temperaturas da análise BASE_2m começam a aumentar, chegando a atingir uma temperatura de estabilização do betão nas primeiras idades de 55.3°C, ou seja, mais 2.7°C que a temperatura verificada na Análise Base. Na superfície convectiva, topo da camada, os gráficos da Fig.4.12 permitem concluir que a influência da betonagem de camadas com 2m de altura só se faz sentir a partir do 6º dia, precisamente no momento da betonagem de mais uma camada.

4.4.1.3. Otimização do processo construtivo

Para otimizar o processo construtivo é necessário confrontar análises com dias de espera e espessuras de camadas diferentes, em simultâneo. De modo a escolher a melhor opção ao nível da obtenção de temperaturas mais baixas, é necessário uma análise que misture estas duas variáveis.

Como o processo construtivo tem um grande impacto ao nível de prazos, procedeu-se à comparação de processos construtivos que não diferissem muito a este nível. Deste modo, é razoável comparar a análise BASE e BASE_5D com as análises BASE_2m_5D e BASE_2m_7D, respetivamente.

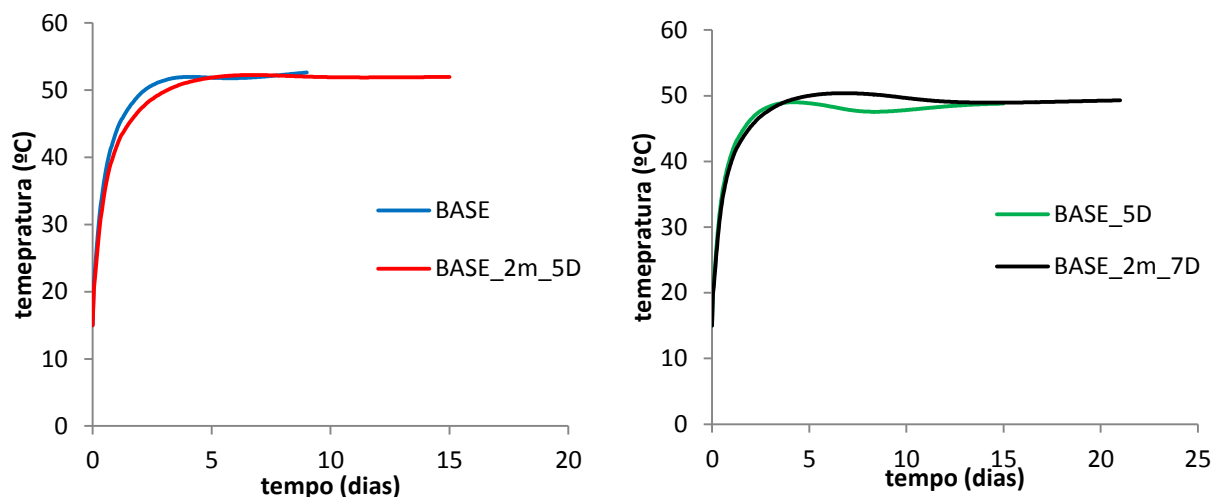


Fig.4.13 - Variação da temperatura no betão em diferentes processos construtivos: base da camada

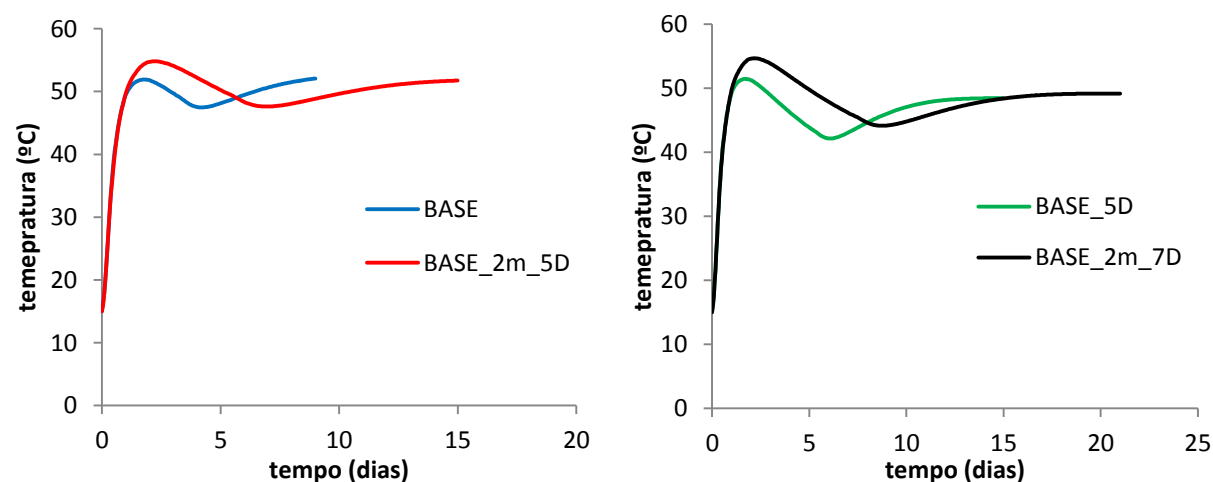


Fig.4.14 - Variação da temperatura no betão em diferentes processos construtivos: meio da camada

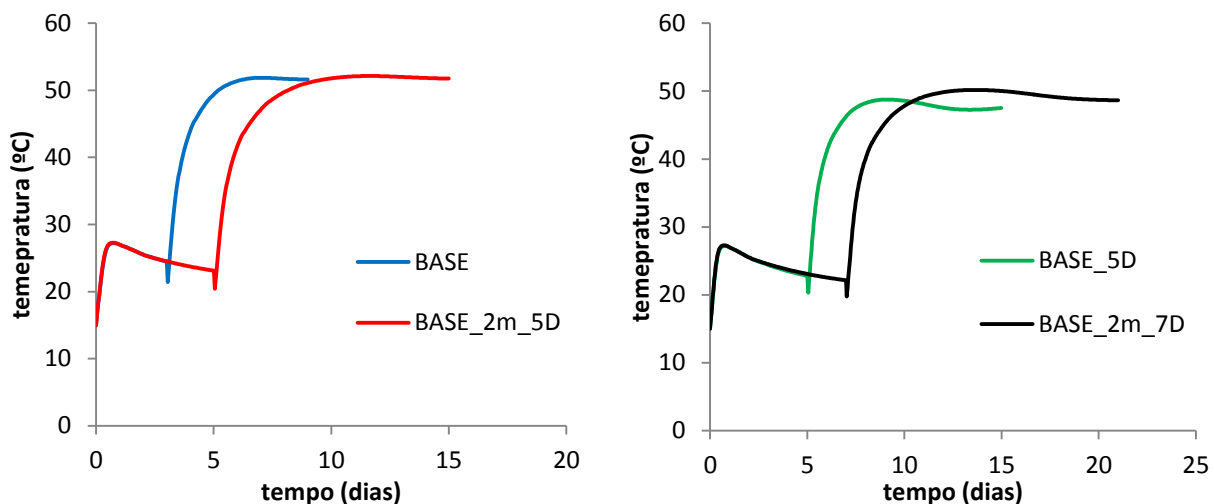


Fig.4.15 - Variação da temperatura no betão em diferentes processos construtivos: topo da camada

Na situação em que se confronta a análise BASE com a BASE_2m_5D verificamos que os gráficos associados à base da camada, Fig.4.13, não apresentam grandes diferenças ao nível da temperatura máxima atingida e ao nível da temperatura registada no final das análises (o mesmo se verifica para o topo da camada, Fig.4.15). A maior diferença está nos gráficos associados ao meio da camada, Fig.4.14, em que verifica uma variação de mais 3°C na temperatura de pico para a análise BASE_2m_5D, sendo que a temperatura de estabilização do betão se mantém praticamente igual.

Os resultados apresentados permitem concluir que para a situação comparativa entre a análise BASE_5D e a análise BASE_2m_7D, as conclusões a retirar são idênticas às já apresentadas para a comparação anterior.

Em termos térmicos, o confronto destas análises parece revelar que os processos construtivos associados às análises BASE e a BASE_5D são os mais vantajosos. Contudo, para ter a certeza é necessário calcular o campo de tensões no betão, pois só assim é possível validar qualquer conclusão.

4.4.2. INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE COLOCAÇÃO DO BETÃO

A temperatura inicial do betão é das condições que mais pode influenciar o campo térmico nas primeiras idades. De forma a quantificar essa influência, fez-se variar a temperatura inicial do betão para 10°C, o que deu origem à análise BASE_Tb10 (ver Tabela 3).

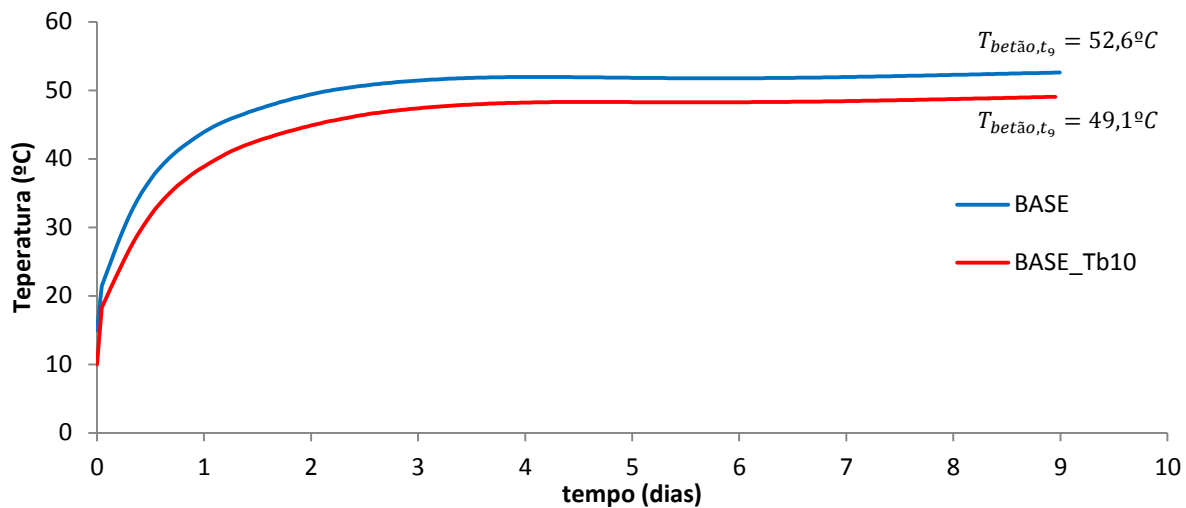


Fig.4.16 - Variação da temperatura no betão para diferentes temperaturas de colocação: base da camada

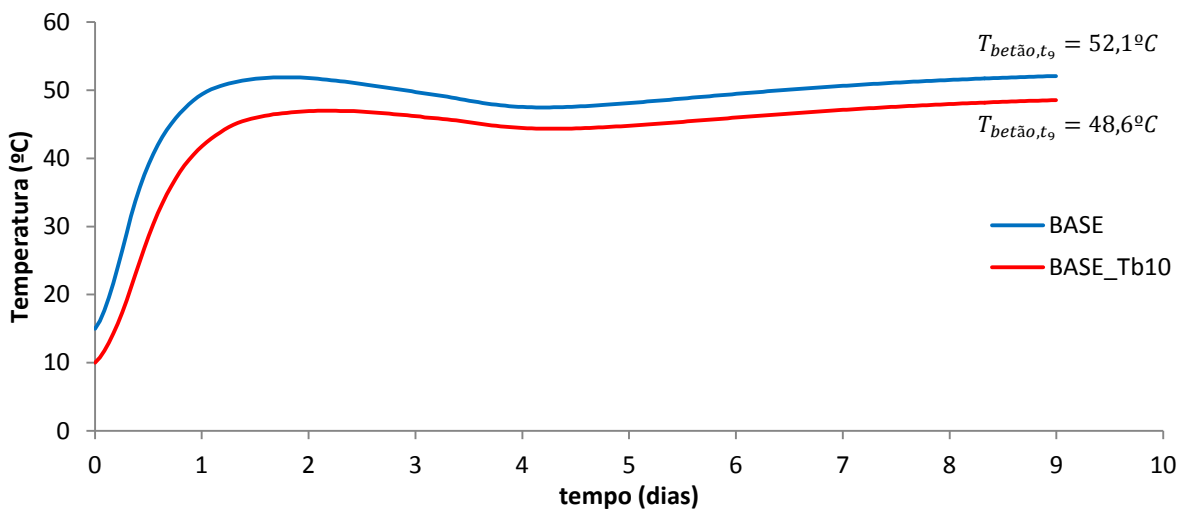


Fig.4.17 - Variação da temperatura no betão para diferentes temperaturas de colocação: meio da camada

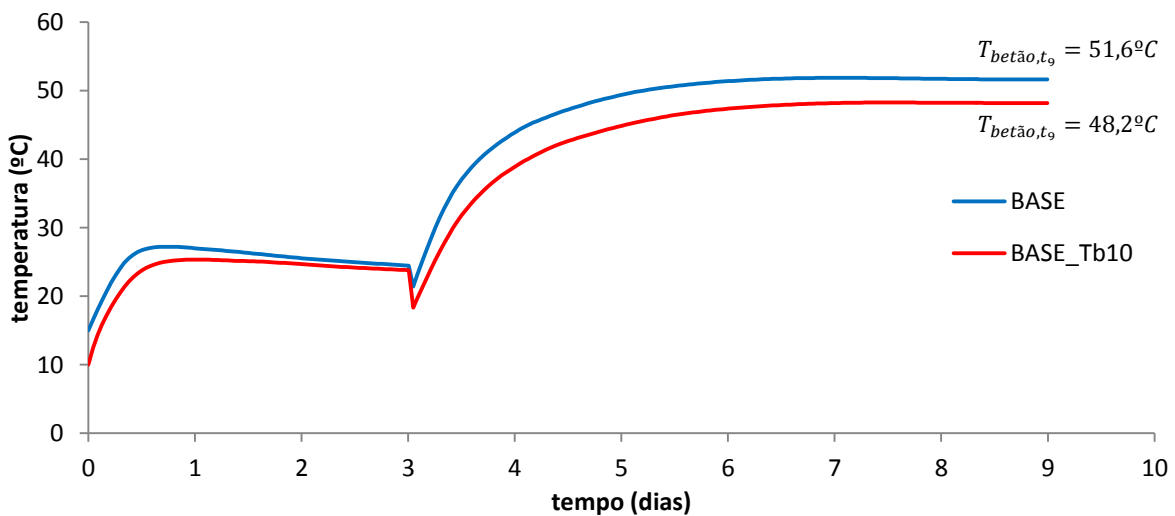


Fig.4.18 - Variação da temperatura no betão para diferentes temperaturas de colocação: topo da camada

Estudando o meio da camada, Fig.4.17, verificamos uma diminuição da temperatura de pico no betão em cerca de 5°C, quando comparado com a análise BASE. Logo, a diminuição da temperatura de colocação do betão é transformada na sua totalidade em decréscimo de temperatura interna. No entanto, analisando a temperatura no fim da análise correspondente aos 9 dias, verifica-se que esse acréscimo de temperatura é inferior e corresponde acerca de 3.5°C. Tal acontece, porque nesta fase já foram betonadas mais 2 camadas e também já existe a influência da perda de calor por convecção nos topos.

Relativamente à base da camada, Fig.4.16, verifica-se que a partir dos 3 dias, a diferença entre temperaturas é cerca de 3.5°C, mantendo-se constante durante o período de análise. Nos gráficos da Fig.4.18 referentes ao topo da camada é de salientar um decréscimo de temperaturas menos acentuado entre 1º e o 3º dia na análise BASE_Tb10, devido à existência de um gradiente térmico inferior entre a temperatura do betão e a temperatura ambiente durante essa idade (menores trocas de calor por convecção entre o betão e o ar). A partir dos 3 dias, como se betona uma nova camada, as conclusões retiradas por esses mesmos gráficos, são idênticas às expostas anteriormente quando se analisou a base da camada.

4.4.3. INFLUÊNCIA DA UTILIZAÇÃO DE DIFERENTES QUANTIDADES DE CIMENTO

Em estruturas como os pilares de descarregador de cheias é usual a utilização de elevadas quantidades de cimento. No entanto, tal como referido anteriormente, a dosagem de cimento utilizada não está otimizada, com tal optou-se por realizar uma análise com um teor de cimento mais baixo (300 Kg/m³ de cimento com 0% de adições). De forma a identificar as diferenças de temperatura no betão, efetuou-se um estudo paramétrico variando apenas o teor de cimento do material, sendo para isso necessário alterar a curva adiabática do betão, Fig.4.19. Tal opção deu lugar à análise BASE_300.

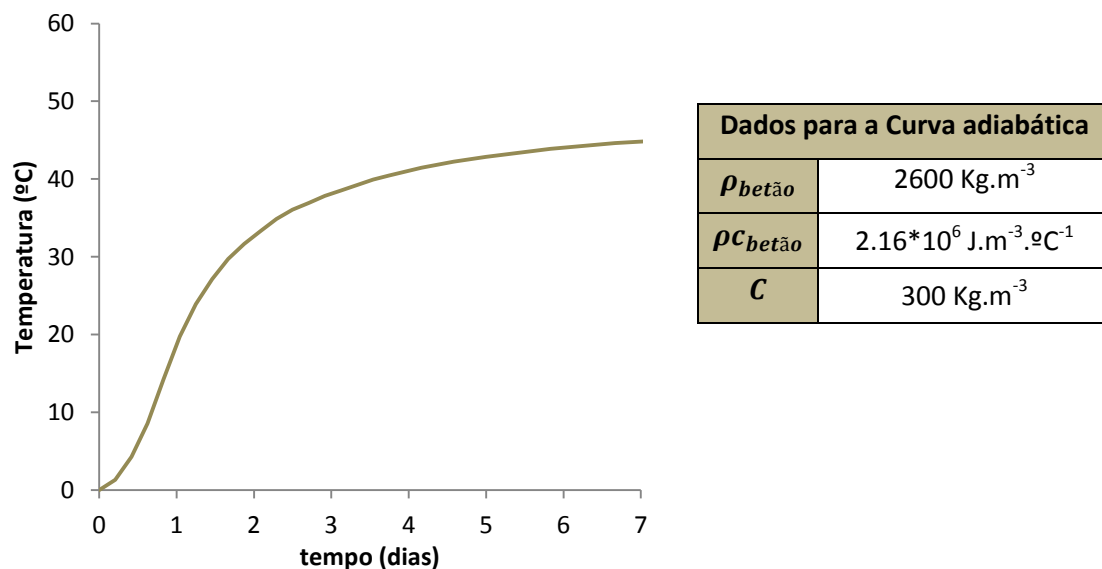


Fig.4.19 - Gráfico da curva adiabática do betão (300 Kg/m³ de cimento) e respetivos dados

A utilização de uma menor quantidade de cimento implica a geração de temperaturas mais baixas no betão durante as primeiras idades. Como tal, os resultados observados estão dentro do expectável.

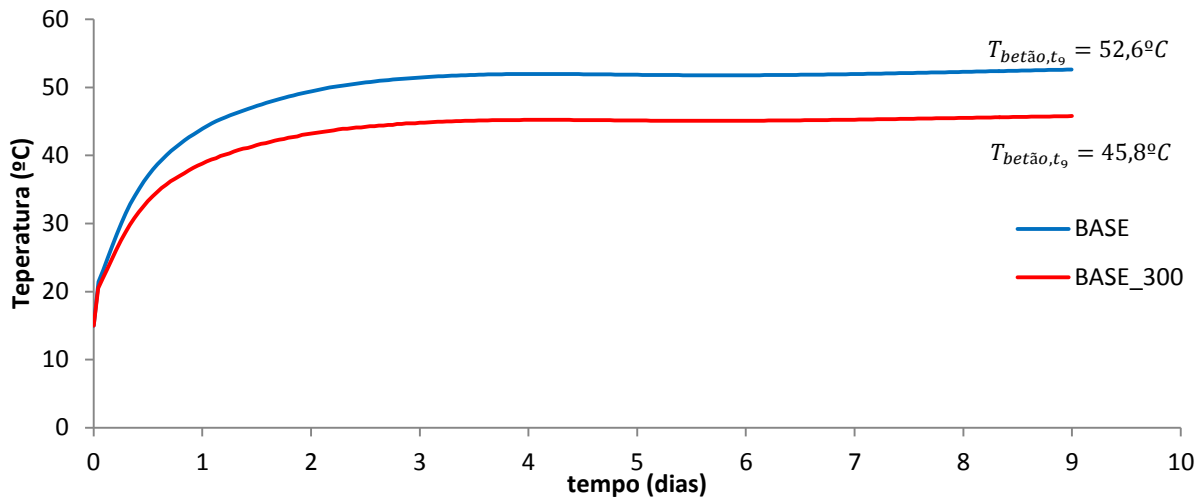


Fig.4.20 - Variação da temperatura no betão utilizando diferentes quantidades de ligante: base da camada

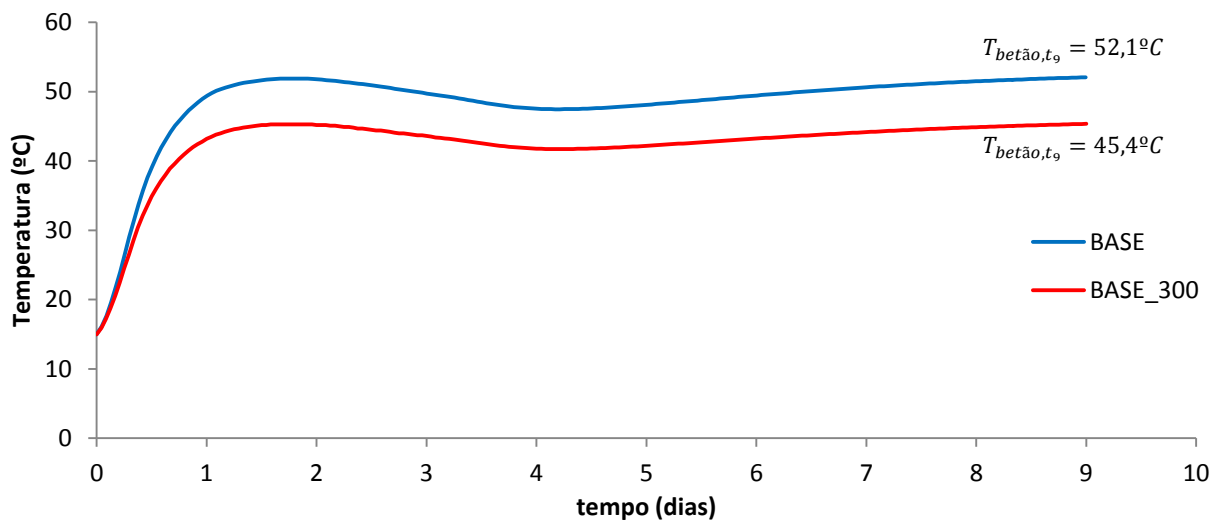


Fig.4.21 - Variação da temperatura no betão utilizando diferentes quantidades de ligante: meio da camada

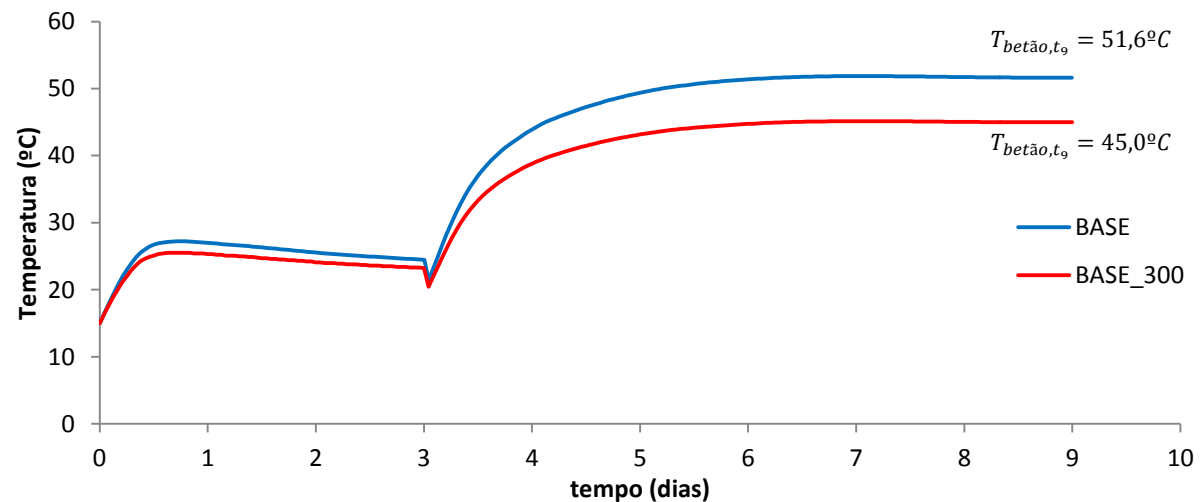


Fig.4.22 - Variação da temperatura no betão utilizando diferentes quantidades de ligante: topo da camada

Analisando os gráficos da Fig.4.20 verificamos que a partir dos 3 dias as consequências de se usar este teor de cimento em vez do utilizado no modelo base, reflete-se em diferenças de temperatura na ordem dos 6.5°C. Analisando os gráficos relativos ao meio da camada, Fig.4.21, verifica-se que a partir dos 1.5 dias se regista essa mesma diferença (6.5°C) entre ambas as análises. Os gráficos que exibem os resultados para o topo da camada, Fig.4.22, apresentam resultados pouco relevantes quanto à variação térmica do betão durante os primeiros 3 dias. Contudo, posteriormente à betonagem de uma nova camada nessa data, o gráfico assume um comportamento idêntico ao exposto na Fig.4.20 para a base da camada, registando as mesmas diferenças térmicas.

A utilização de betão com 300 kg.m³ de cimento é vantajosa, no ponto de vista do comportamento térmico do betão nas primeiras idades. Contudo, é necessário a realização de análises mecânicas de forma a validar esta opção, porque a utilização de menores quantidades de cimento reflete-se também numa diminuição da resistência mecânica do betão.

4.4.4. INFLUÊNCIA DA UTILIZAÇÃO DE CINZAS VOLANTES

O betão utilizado no pilar de descarregador de cheias não contém nenhum tipo de adições. No entanto, como foi fornecido acesso a resultados experimentais de calorimetria adiabática sobre pastas com diferentes dosagens de cinzas efetuou-se um estudo paramétrico com a mesma quantidade de ligante, 370 Kg.m³, sendo que uma certa percentagem desse teor corresponde a cinzas volantes. É de referir que estes resultados experimentais são relativos ao betão utilizado especificamente neste projeto.

Esta análise surge apenas com o objetivo de adquirir alguma sensibilidade relativamente à variação do campo térmico do betão quando se utilizam estas cinzas. À semelhança daquilo que foi feito em 4.4.3 é necessário introduzir uma nova curva adiabática do betão que considere o efeito provocado pelas cinzas.

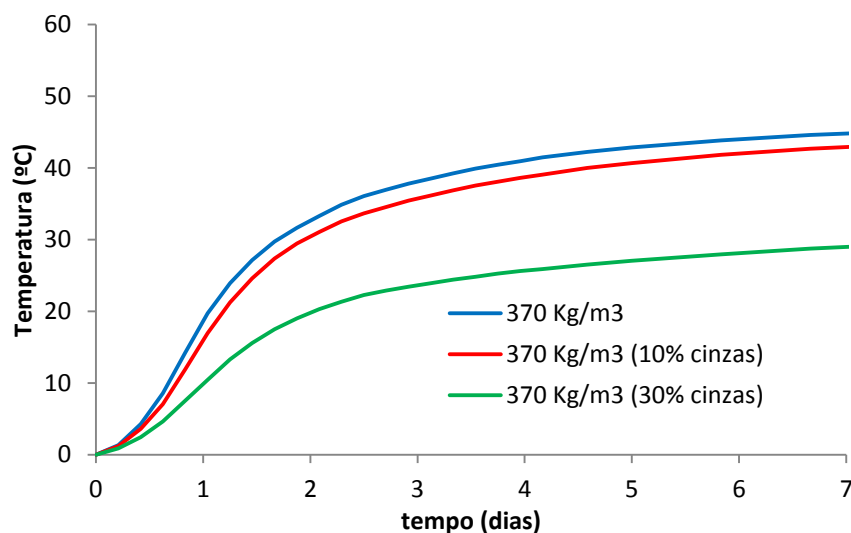
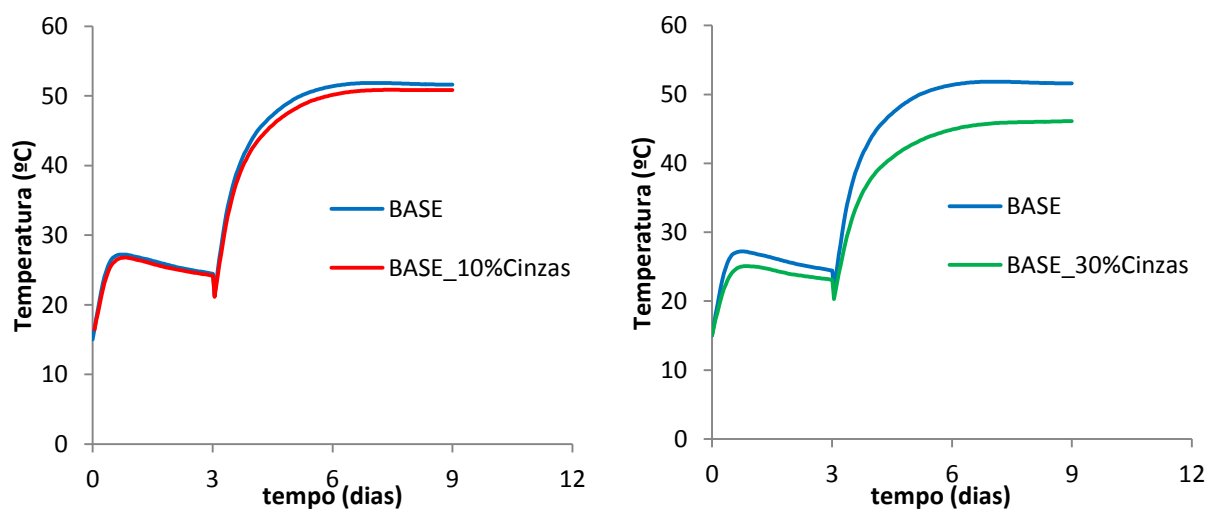
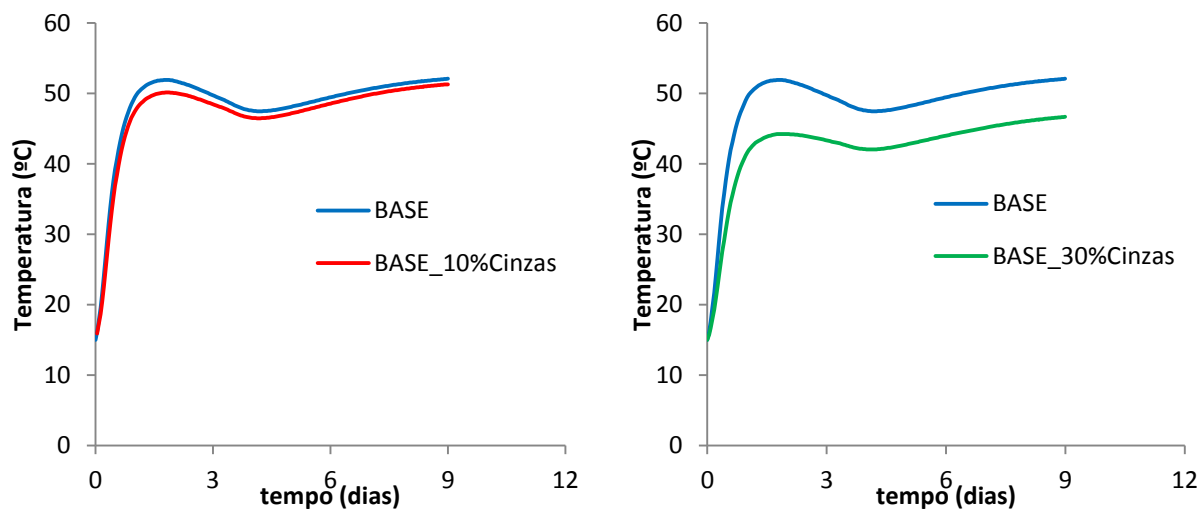
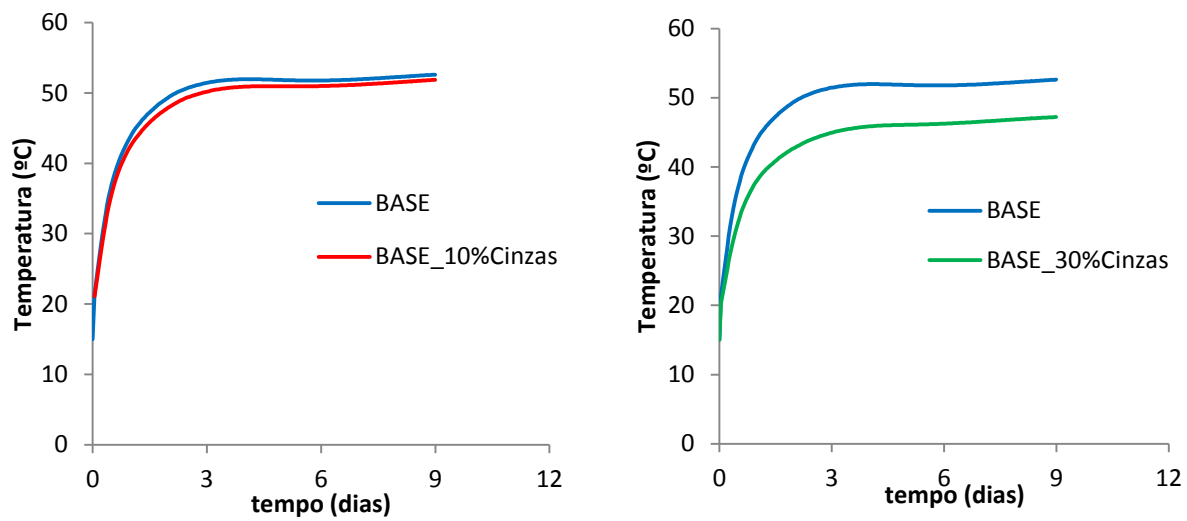


Fig.4.23 - Gráfico da curva adiabática do betão com diferentes percentagens de cinzas

Apresentam-se agora os gráficos relativos à variação da temperatura do betão utilizando 10% e 30% de cinzas volantes em 370 Kg.m³ de ligante, que correspondem às análises BASE_10%Cinzas e BASE_30%Cinzas, respetivamente.



Relativamente aos gráficos associados à utilização de 10% de cinzas verifica-se que estas não conferem diferenças de temperatura significativas, registando-se em média diferenças de 1°C e no máximo de 2°C (temperatura de pico associada ao meio da camada).

Utilizando 30% de cinzas verificam-se diferenças bastante significativas na variação da temperatura em todas as camadas do betão. Em média verifica-se uma diminuição de 5°C da temperatura final da análise. A temperatura de pico no betão, associada ao meio da camada, regista um decréscimo de cerca de 6°C.

4.4.5. INFLUÊNCIA DE BETONAR EM SITUAÇÕES DE TEMPERATURA AMBIENTE EXTREMAS

Nas análises apresentadas anteriormente foi sempre considerada uma situação de temperatura média ambiente de 18°C. No entanto, é necessário atender ao facto de que a betonagem pode ocorrer em situações bastante mais extremas, como por exemplo num dia de Verão muito quente, ou num dia de Inverno muito frio.

As análises que se sucedem terão em linha de conta a influência de betonar com diferentes temperaturas ambiente, que obviamente será tratada considerando situações extremas, de modo a obter um intervalo para os resultados.

4.4.5.1. Temperatura ambiente constante

Numa abordagem mais simples, e atendendo à localização geográfica da barragem onde está a ser estudado o comportamento térmico do pilar de descarregador, adotou-se 30°C como temperatura média diária de um dia de Verão, e 5°C como temperatura média diária de um dia de Inverno.

As condições Verão/Inverno poderão condicionar a temperatura de arrefecimento do betão no instante inicial da betonagem. Em dias de Inverno em que a temperatura ambiente é consideravelmente inferior, admitiu-se a hipótese de que o betão é colocado a 10°C. No entanto, para um dia de Verão considerou-se que o betão é colocado na mesma a 15°C, tal como na análise BASE, porque é notório que as temperaturas atingidas serão excessivamente elevadas, inviabilizando à partida que este seja colocado a temperaturas superiores.

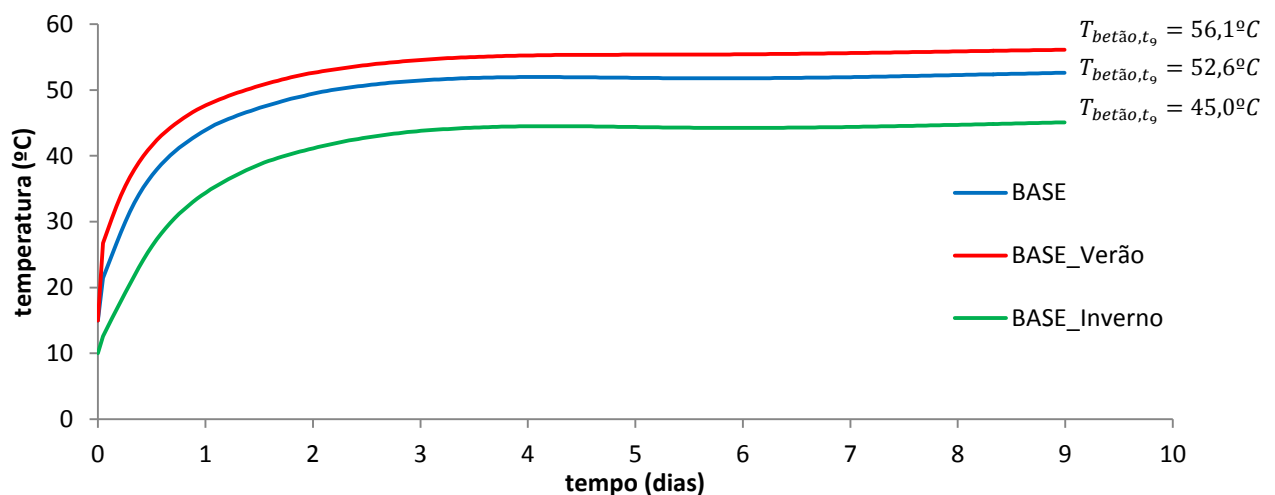


Fig.4.27 - Variação da temperatura do betão sujeito a condições extremas Verão/Inverno: base da camada

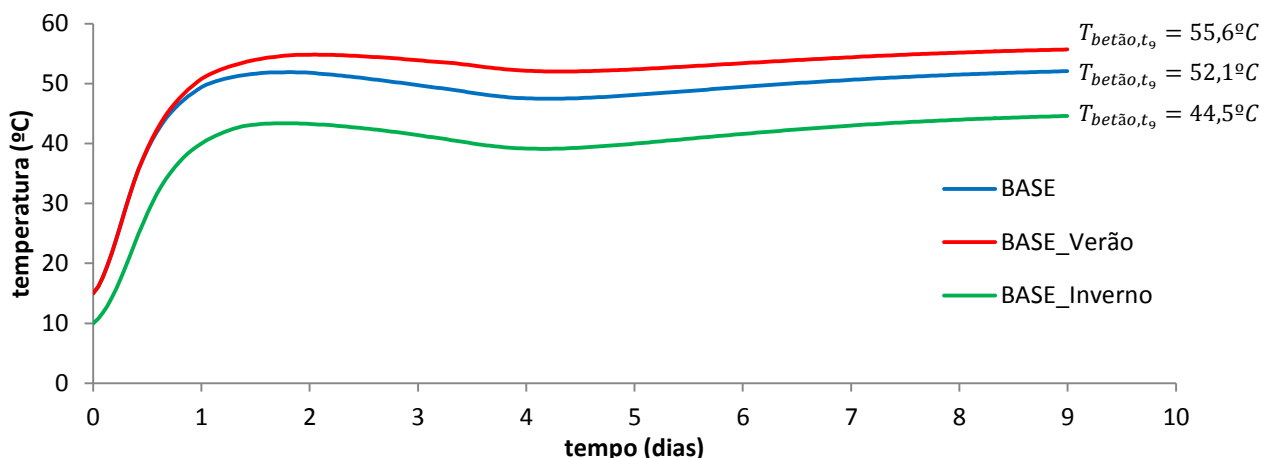


Fig.4.28 - Variação da temperatura do betão sujeito a condições extremas Verão/Inverno: meio da camada

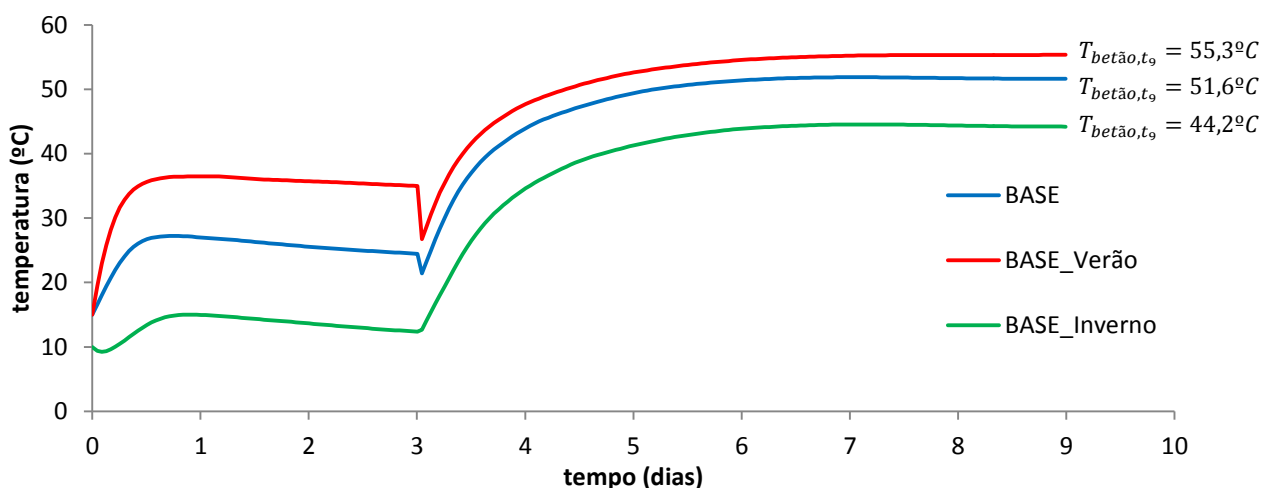


Fig.4.29 - Variação da temperatura do betão sujeito a condições extremas Verão/Inverno: topo da camada

Relativamente aos gráficos da Fig.4.27, Fig.4.28 e Fig.4.29 verifica-se que para estas condições mais extremas, o betão poderá atingir temperaturas bastante distintas das determinadas na análise BASE.

A temperatura registada no final da análise BASE, aos 9 dias, é de cerca de 52°C, seja no topo, meio ou base da camada do betão. No entanto no caso das análises BASE_Verão e BASE_Inverno, esta temperatura poderá estar à volta dos 55.5°C e 44.5°C, respetivamente.

Isto implica que ao fim dos 9 dias de análise, no caso de estarmos a betonar no Verão, se registem temperaturas superiores em cerca de 3.5°C à prevista pela análise Base. No caso do Inverno, as temperaturas atingidas podem ser inferiores em cerca de 7.5°C, às previstas na análise Base.

Relativamente à temperatura de pico registada nos gráficos da Fig.4.28 associados ao estudo do meio da camada, as conclusões que se retiram são exatamente as mesmas. O processo construtivo de betonagem de 3 em 3 dias determina um valor para a temperatura de pico praticamente igual à temperatura registada aos 9 dias, seja qual for a análise observada.

4.4.5.2. Curva sinusoidal de evolução da temperatura ambiente diária

A utilização de uma curva sinusoidal de temperaturas, de forma a simular a temperatura ao longo de um típico dia de Verão ou Inverno, poderá permitir obter resultados mais fiáveis e reais. Como tal, através da equação (4.2) simulou-se a curva de temperaturas ao longo de um dia, sendo para isso necessário definir vários parâmetros.

$$T(t) = T_m + A \operatorname{sen}(\omega (t - t_{T_m})) \quad (4.2)$$

em que,

T_m – temperatura média diária (°C)

A – amplitude térmica ao longo do dia (°C)

ω – frequência angular horária

t_{T_m} – instante que se atinge a temperatura média diária (h)

t – tempo (h)

	Verão	Inverno
T_{min}	20.0 °C	2.0 °C
T_{max}	40.0 °C	8.0 °C
A	10.0 °C	3.0 °C
T_m	30.0 °C	5.0 °C
ω	0.262 1/h	0.262 1/h
t_{T_m}	9 h	9 h

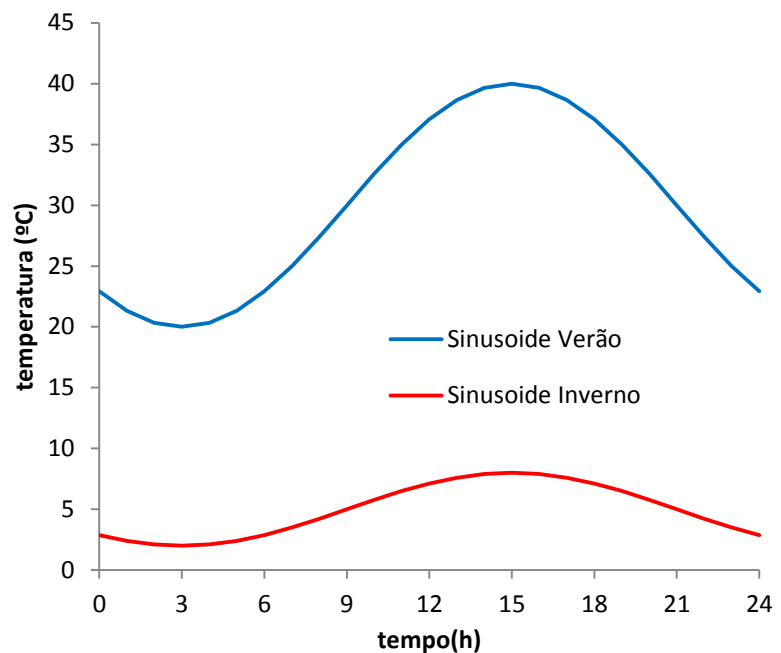


Fig.4.30 - Tabela e gráfico das sinusoides de temperatura no Verão e no Inverno

Com o objetivo de obter análises que possam ser comparáveis com as anteriormente expostas, considerou-se que o valor de T_m num típico dia de Verão é 30°C e num típico dia de Inverno é 5°C.

Sabendo que a temperatura máxima diária é registada por volta das 15h, optou-se por ajustar o instante em que se atinge a temperatura média diária, t_{T_m} , de modo a ser compatível com essa situação. Logo, tanto para o caso de um típico dia de Verão, como de Inverno, considerou-se esse instante às 9h.

De acordo com a localização da obra, adotaram-se as temperaturas máximas e mínimas diárias expostas na Fig.4.30. As sinusoides obtidas foram aplicadas no modelo e deram lugar às análises BASE_SinVerão e BASE_SinInverno. Para estas análises considerou-se o início da betonagem às 9h.

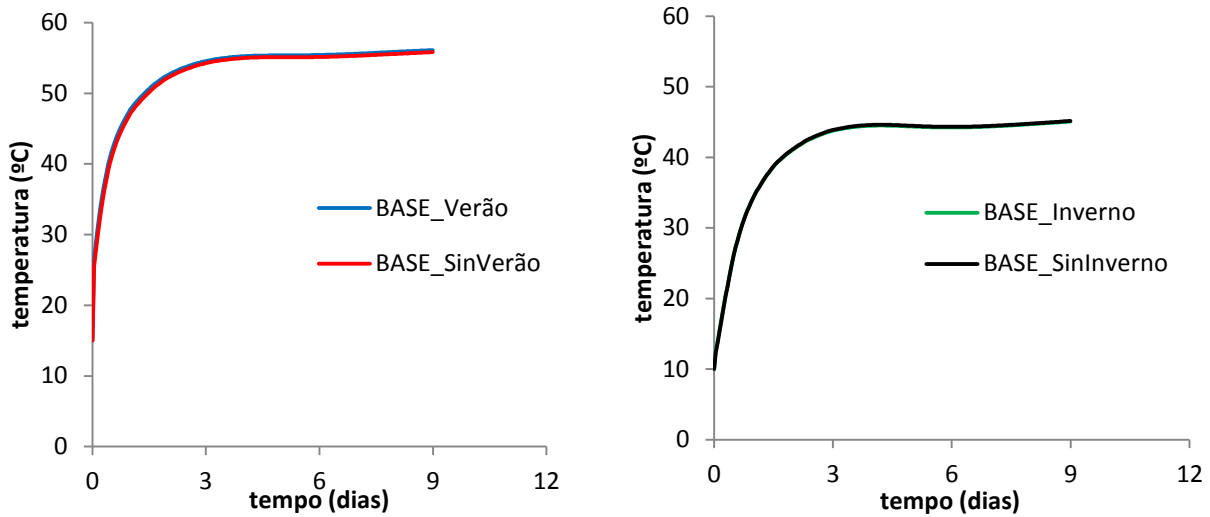


Fig.4.31 - Variação da temperatura na base da camada: senoide de temperatura ambiente Verão/Inverno

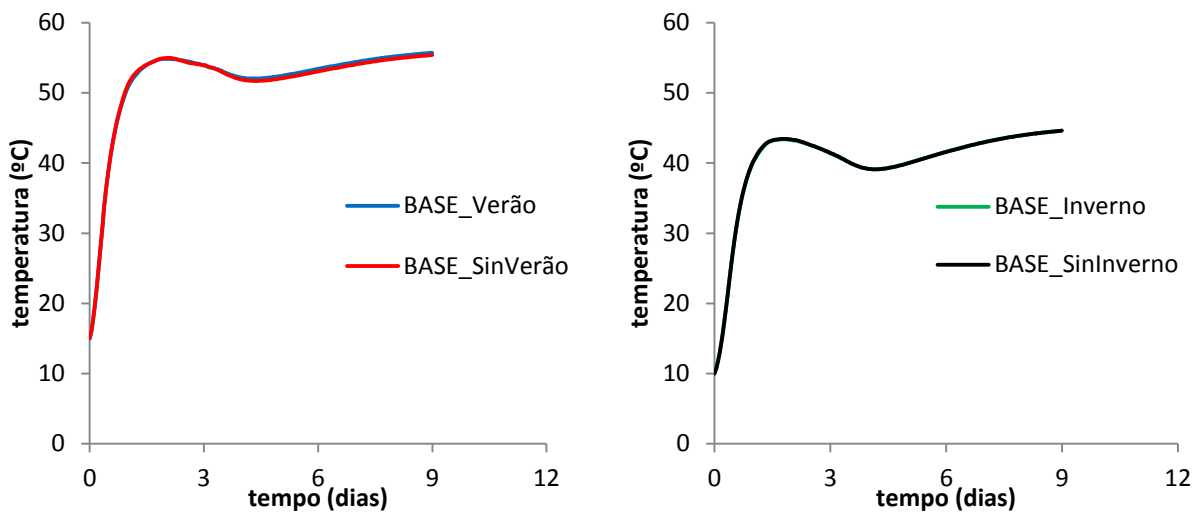


Fig.4.32 - Variação da temperatura na base da camada: senoide de temperatura ambiente Verão/Inverno

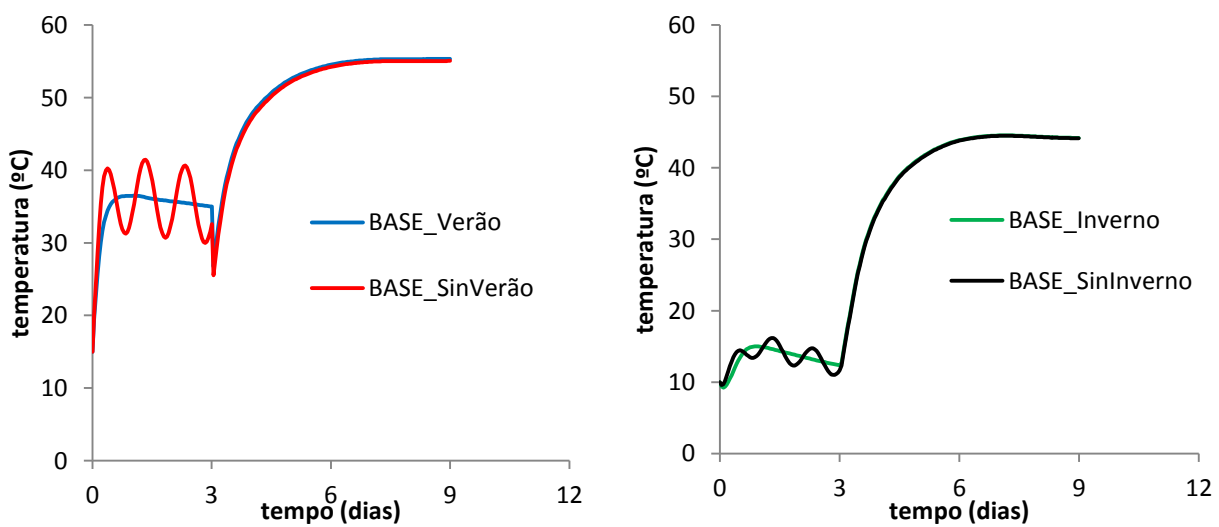


Fig.4.33 - Variação da temperatura no topo da camada: senoide de temperatura ambiente Verão/Inverno

Observando os gráficos da Fig.4.31, Fig.4.32 e Fig.4.33, verifica-se que a consideração da variação de temperatura ambiente ao longo do dia, pouco altera as conclusões registadas anteriormente. As curvas produzidas pelas análises BASE_SinVerão e BASE_Sin Inverno são praticamente coincidentes com as curvas BASE_Verão e BASE_Inverno, respetivamente. Logo, as conclusões ao nível das temperaturas atingidas pelo betão em situação de Verão ou Inverno são idênticas às já expostas quando se considerou que a temperatura ambiente era constante.

O mais relevante destas análises é a temperatura do betão registada no topo da camada, ao longo dos primeiros 3 dias (Fig.4.33). Em ambas as análises, BASE_SinVerão e BASE_SinInverno, as curvas de temperaturas no betão assumem uma forma sinusoidal, durante este período de tempo. O que permite determinar que a temperatura no topo das camadas é muito dependente da temperatura ambiente, uma vez que esta zona do betão se encontra em contacto direto com o ar.

Através da Fig.4.43, verificamos que em dias de Inverno, a consideração da senoide de temperaturas pouco influencia a temperatura do betão. As temperaturas traduzidas pela análise BASE_SinInverno assumem uma amplitude bastante baixa, sendo estas aproximáveis à curva registada na análise BASE_Inverno.

No caso de um típico dia de Verão, o gráfico obtido na Fig.4.43 para análise BASE_SinVerão assume um maior relevo. As temperaturas atingidas nos primeiros 3 dias oscilam entre valores de 30 e 41°C.

O que todas estas análises indicam é que pode não haver um grande interesse em adotar uma curva de variação de temperatura ambiente ao longo do dia, já que não se constata alterações significativas do campo térmico do betão.

4.4.6. INFLUÊNCIA DA RADIAÇÃO SOLAR

A radiação solar poderá ser preponderante na determinação do campo térmico do betão, principalmente em dias de Verão muito quentes. De modo a determinar a importância da radiação solar, foi necessário ponderar a melhor maneira de a considerar, de forma a incluir corretamente este fenómeno no caso de estudo.

De acordo com o exposto em 2.1.5.5., decidiu-se determinar o fluxo de radiação solar incidente, tendo por base diferentes parâmetros. Deste modo obtiveram-se quatro curvas, Fig.4.34, que representam a radiação solar num típico dia de Verão e Inverno, para situações de céu limpo e céu nublado.

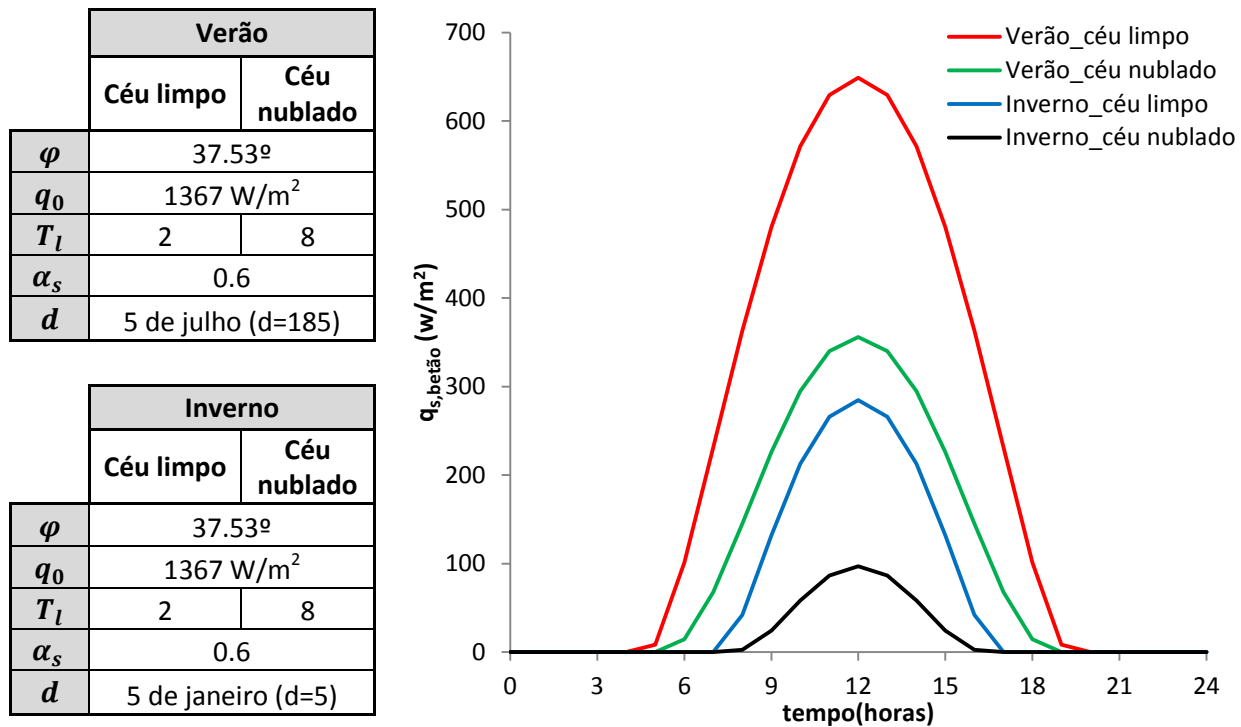


Fig.4.34 - Tabela e gráficos do fluxo de radiação solar Verão e Inverno, em situações de céu limpo e nublado

De acordo com o caso em estudo, a partir da latitude, φ , associada à localização do pilar e sabendo que a constante solar, q_0 , a absorvidade, α_s , e o fator de turbidez, T_l , assumem valores que estão de acordo com as referências expostas no capítulo 2, é possível determinar o fluxo de calor incidente no betão associado à radiação solar.

Em concordância com o exposto nesse capítulo, é de salientar que apenas se referiram valores para o fator de turbidez em situações de céu limpo e céu poluído. No entanto, outras referências (Bolander, J.E.K., K ; Sasaki, K, 2014) em que foram elaborados ensaios experimentais, permitiram concluir que o fluxo de radiação solar em dias de céu nublado é inferior a metade do fluxo de radiação solar em dias de céu limpo. Como tal, o fator de turbidez para dias de céu nublado foi calibrado, de modo a verificar a situação anteriormente referida (ver Fig.4.34).

As faces laterais do pilar (consideradas superfícies adiabáticas no modelo) estão orientadas nas direções este-oeste. No entanto, a radiação solar assume particular importância no topo das camadas, visto que a sua incidência é constante ao longo do dia. Logo, considerou-se este fenómeno como um fluxo de calor incidente no topo das camadas, sendo que nas superfícies laterais foi desprezado. Sabendo que o ângulo entre o paramento e a superfície horizontal do plano, α , assume o valor de 0°, obtém-se uma simplificação da expressão (2.30):

$$\cos(i) = \sin(h) \quad (4.3)$$

em que,

h – altura solar (°)

i – ângulo de incidência (°)

Recorrendo às restantes equações presentes em 2.1.5.5. determinaram-se os fluxos de calor de radiação solar, sendo que se tomou como referência o dia 5 de julho, como um típico dia de Verão, e 5 de janeiro, como um típico dia de Inverno.

De acordo com o exposto na Tabela 3, para a determinação da necessidade de considerar a radiação solar no modelo final do pilar de descarregador de cheias, realizaram-se quatro análises. As análises BASE_SinVerão_qs1 e BASE_SinVerão_qs2 consideram simultaneamente a senoide de temperaturas e radiação solar num dia de Verão em situações de céu limpo e céu nublado, respetivamente. As análises BASE_SinInverno_qs3 e BASE_SinInverno_qs4 consideram simultaneamente a senoide de temperaturas e a radiação solar num dia de Inverno, em situações de céu limpo e céu nublado, respetivamente.

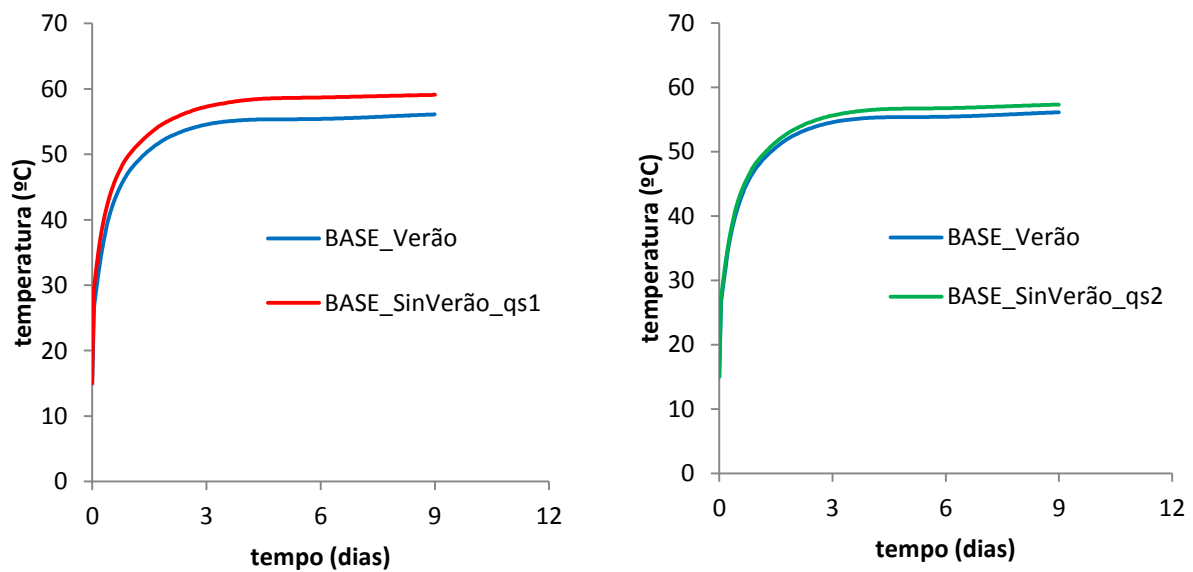


Fig.4.35 - Variação da temperatura do betão: Sinusoide de temperatura ambiente de Verão e radiação solar em situação de céu limpo (esquerda) e céu nublado (direita): base da camada

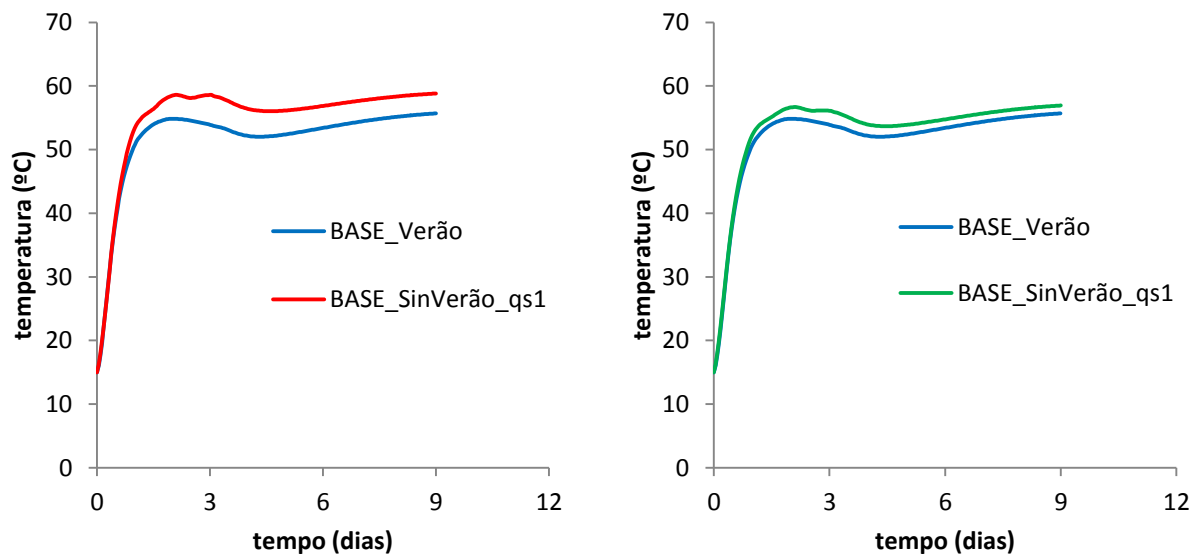


Fig.4.36 - Variação da temperatura do betão: Sinusoide de temperatura ambiente de Verão e radiação solar em situação de céu limpo (esquerda) e céu nublado (direita): meio da camada

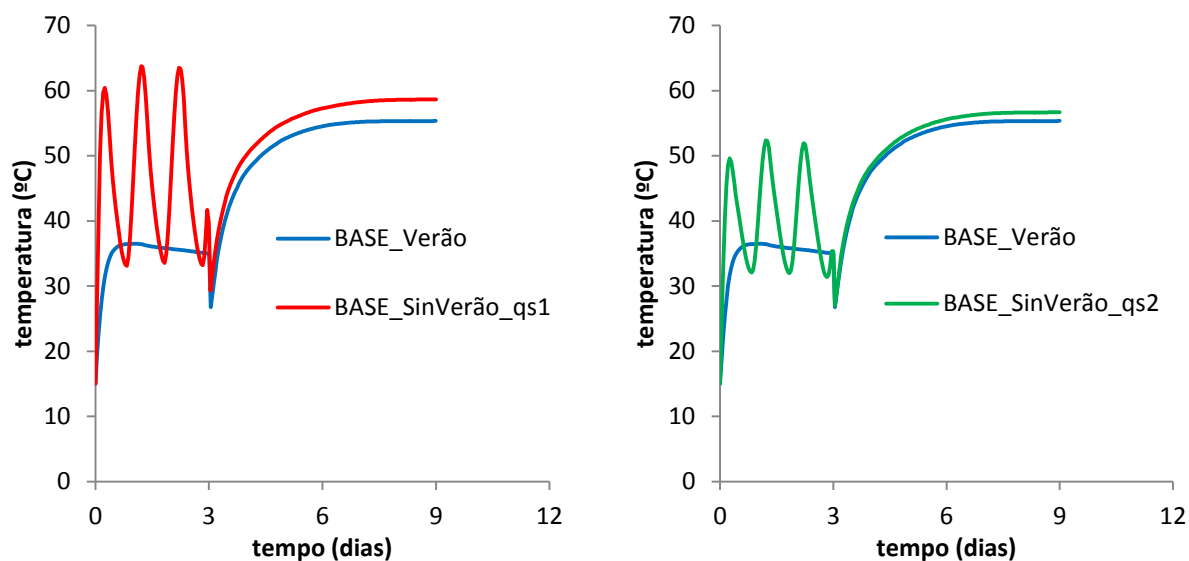


Fig.4.37 - Variação da temperatura do betão: Sinusoide de temperatura ambiente de Verão e radiação solar em situação de céu limpo (esquerda) e céu nublado (direita): topo da camada

Tal como é possível verificar pelas figuras acima apresentadas, a radiação solar assume uma grande importância em dias de Verão. Os resultados mais relevantes são os associados à análise BASE_SinVerão_qs1, ou seja, em situações de céu limpo, onde se registam temperaturas superiores em cerca de 3°C às registadas na análise BASE_Verão.

Em dias de céu nublado, à qual está associada a análise BASE_SinVerão_qs2, constata-se uma pequena variação térmica, de cerca de 1°C, quando comparada com a análise BASE_Verão.

É relevante referir que no topo da camada, Fig.4.37, há uma variação de temperatura no betão muito significativa durante os primeiros 3 dias, ou seja, quando a camada está exposta diretamente ao sol. São atingidas temperaturas de 63°C e 52°C, em situações de céu limpo e céu nublado, respetivamente.

Convém ter em atenção que estas temperaturas podem ser determinantes no estudo de fendas superficiais no betão, uma vez que a alguns centímetros abaixo dessa superfície a radiação solar não tem tanta influência no campo térmico do betão, o que leva ao aparecimento de elevados gradientes térmicos. Uma das explicações para se atingirem temperaturas tão elevadas à superfície, justifica-se pelo facto da sinusoide de temperaturas ambiente entrar em fase com a curva da radiação solar, elevando a temperatura do betão para valores bastante significativos.

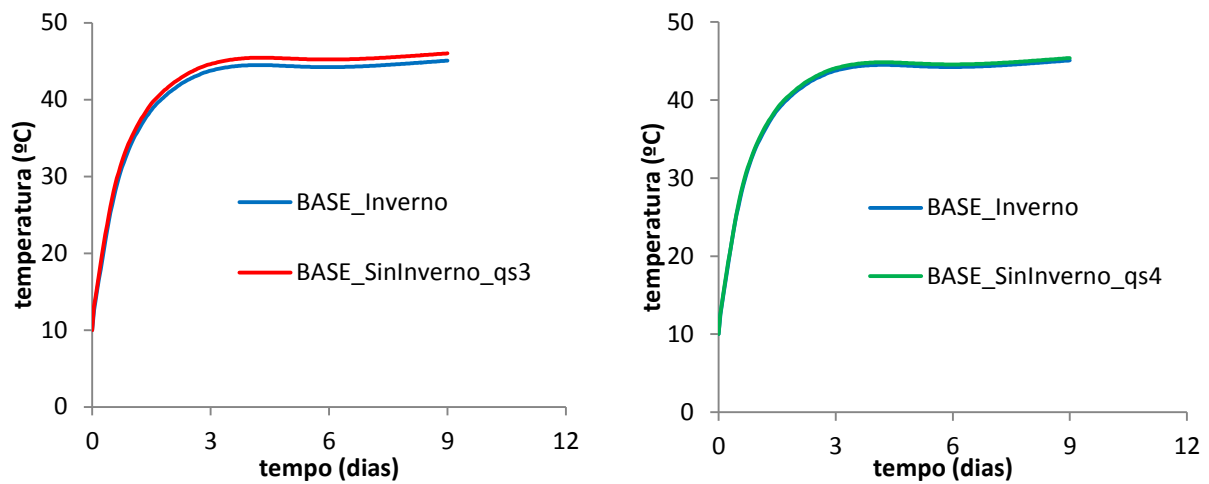


Fig.4.38 - Variação da temperatura do betão: Sinusoide de temperatura ambiente de Inverno e radiação solar em situação de céu limpo (esquerda) e céu nublado (direita): base da camada

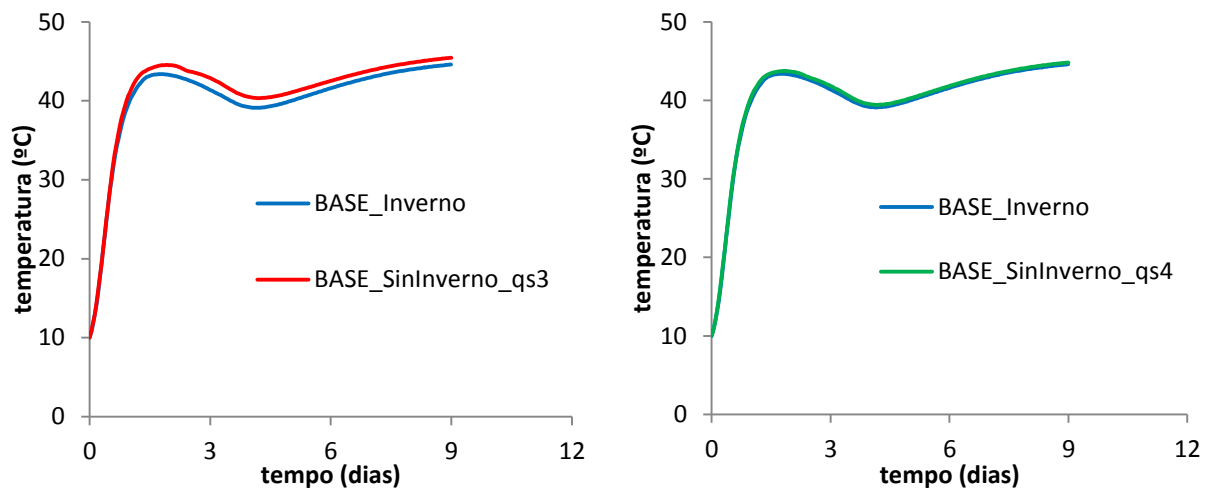


Fig.4. 39 - Variação da temperatura do betão: Sinusoide de temperatura ambiente de Inverno e radiação solar em situação de céu limpo (esquerda) e céu nublado (direita): meio da camada

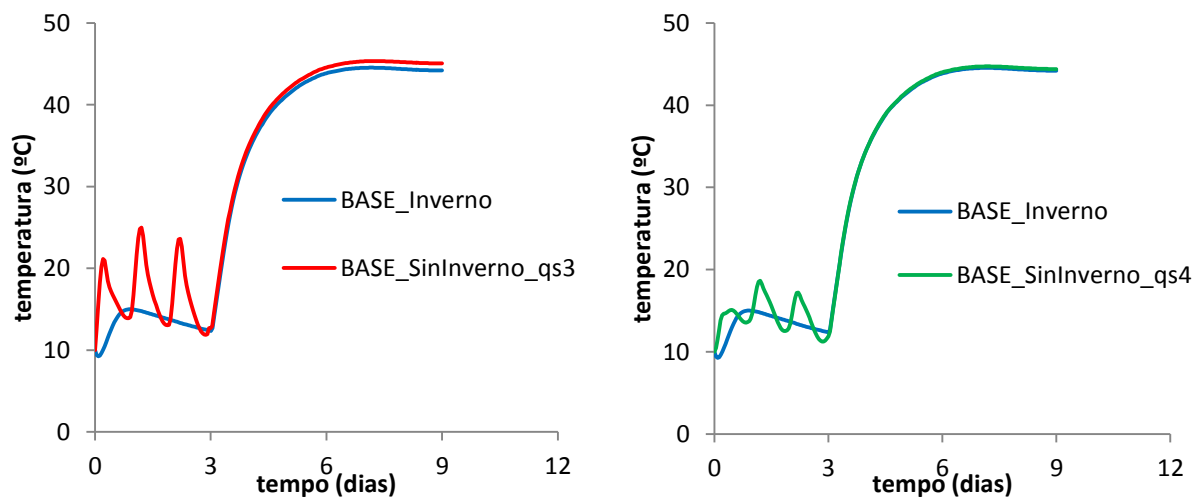


Fig.4.40 - Variação da temperatura do betão: Sinusoide de temperatura ambiente de Inverno e radiação solar em situação de céu limpo (esquerda) e céu nublado (direita): topo da camada

Relativamente às análises em situações de Inverno, a influência da radiação solar não é muito significativa, sendo que nos gráficos relativos à análise BASE_SinInverno_qs3 se registam temperaturas superiores à análise BASE_Inverno em apenas 1°C.

Nos gráficos relativos à análise BASE_SinInverno_qs4, ou seja, em situações de céu nublado, o betão não sofre praticamente nenhuma variação térmica, sendo os gráficos praticamente coincidentes com os que foram apresentados pela análise BASE_Inverno.

De um modo geral, a radiação solar assume papel preponderante, principalmente em dias de Verão. Logo, terão que ser adotadas medidas, que visem considerar este fenómeno no modelo final do pilar.

4.4.7. INFLUÊNCIA DA PERDA DE CALOR POR RADIAÇÃO

A introdução da perda de calor por radiação está de acordo com o exposto no capítulo 2. A partir das equações (2.22) e (2.23), considerou-se um valor adequado para a emissividade do betão, ε , e uma temperatura ambiente de 18°C.

$$h_r = 5.1 \rightarrow \begin{cases} \varepsilon = 0.88 \\ T_{amb} = 18^\circ C \end{cases} \quad (4.4)$$

$$h_{cr} = 16.5 + 5.1 = 21.6 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1} \quad (4.5)$$

Deste modo, substituindo o coeficiente de convecção utilizado no Modelo Base, por um coeficiente de convecção-radiação de 21.6 W.m⁻¹.k⁻¹ efetuaram-se as análises agora apresentadas, BASE_Rad e BASE_7D_Rad.

Sabendo que a utilização do coeficiente de convecção-radiação poderá ser mais condicionante em diferentes processos construtivos, é sem dúvida interessante fazer também uma análise com um tempo de espera entre camadas superior. Deste modo, adquire-se alguma sensibilidade relativamente à variação do campo térmico do betão, quando se considera este fenómeno de transmissão de calor.

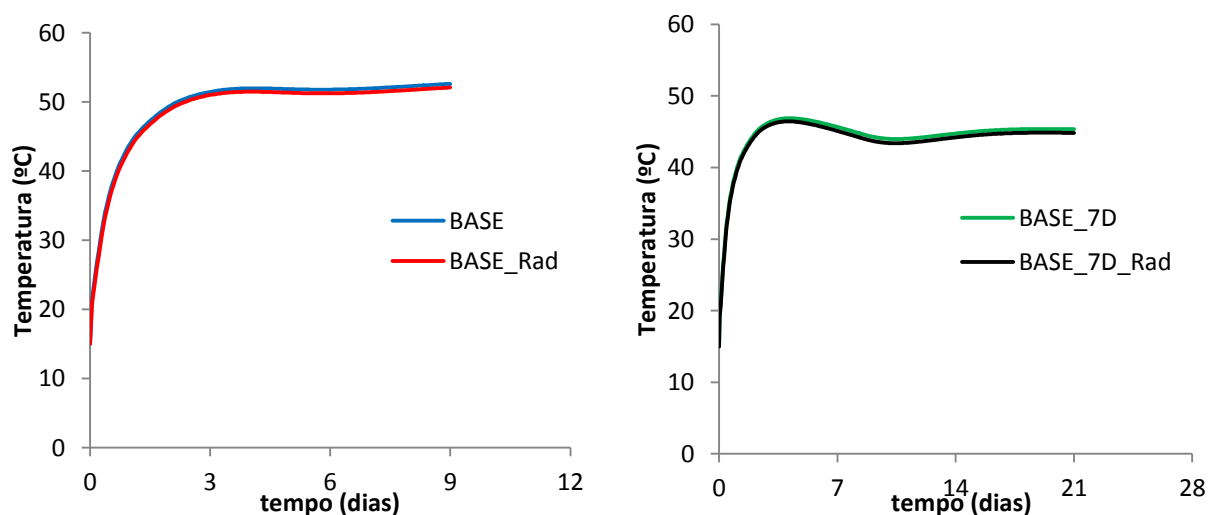


Fig.4.41 - Variação da temperatura no betão considerando perda de calor por radiação: base da camada

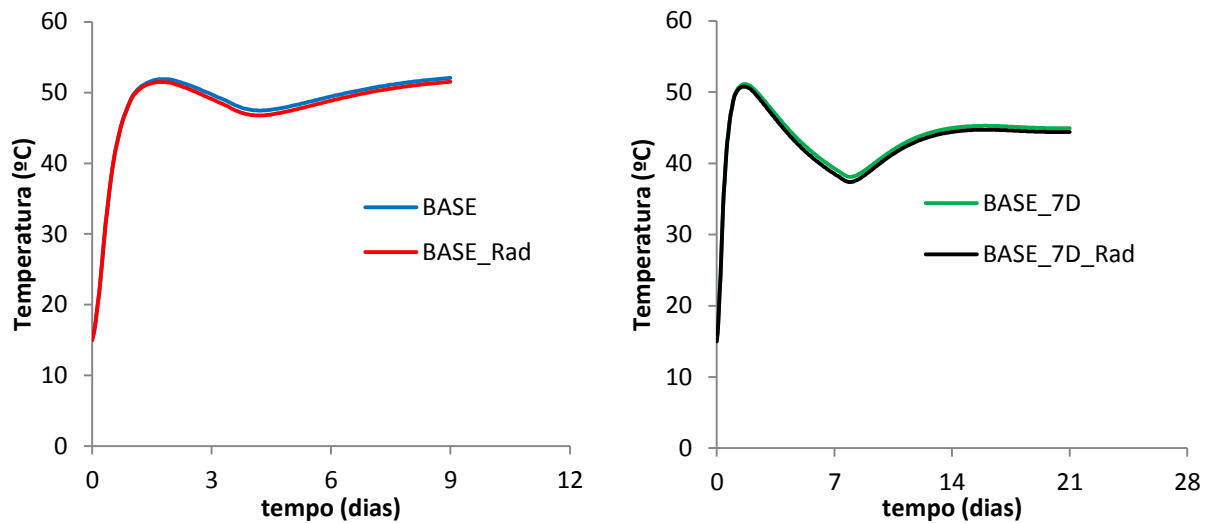


Fig.4.42 - Variação da temperatura no betão considerando perda de calor por radiação: meio da camada

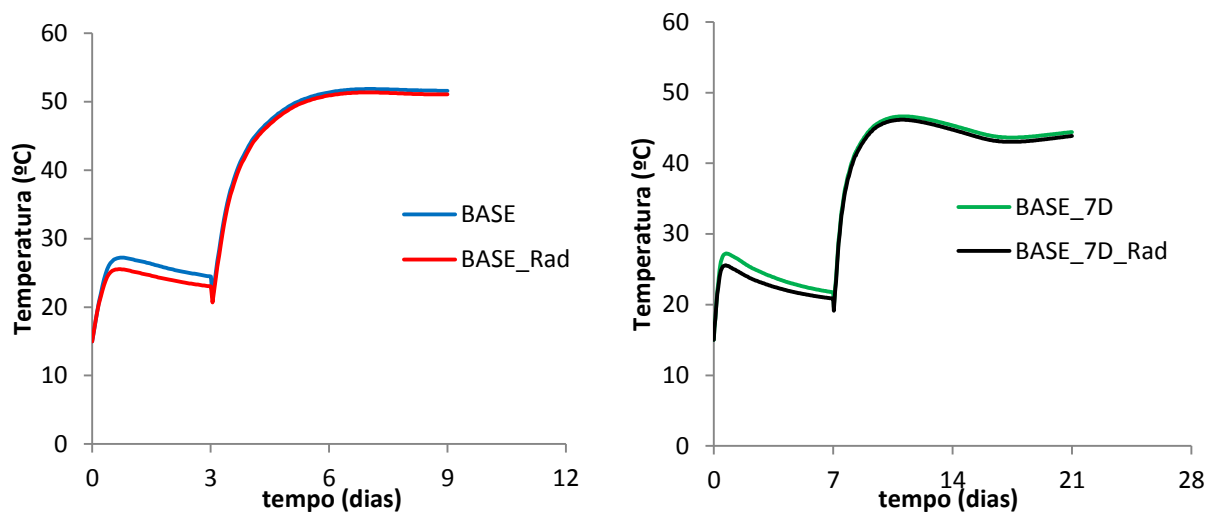


Fig.4.43 - Variação da temperatura no betão considerando perda de calor por radiação: topo da camada

É verificável a partir dos gráficos das Fig.4.41 e Fig.4.42 que a inclusão da perda de calor por radiação não provoca alterações térmicas ao nível da base e do meio da camada de betão, mesmo quando se confronta a análise BASE_7D com a análise BASE_7D_Rad. Como a estas análises estão associados tempos de espera de 7 dias, seria mais provável encontrar diferenças de temperatura mais significativas, já que as camadas de betão perdem calor por radiação durante mais tempo. Nos estudos comparativos expostos nestas duas figuras, registam-se diferenças de temperatura na ordem dos 0.5°C, ou seja, diferenças térmicas praticamente nulas.

No entanto, nos gráficos da Fig.4.43 verificam-se diferenças térmicas um pouco mais significativas durante os primeiros 3 dias, na situação em que confrontamos BASE com BASE_Rad, como também nos primeiros 7 dias, na situação em que confrontamos BASE_7D e BASE_7D_Rad. Estes resultados são claramente espectáveis, porque as análises expostas nesta figura são referentes ao betão no topo da camada, ou seja, precisamente a zona da camada que se encontra em contacto com o ar, a perder calor por radiação e convecção mais rapidamente. Para ambos os estudos comparativos expostos na Fig.4.43 verificam-se diferenças de temperatura na ordem dos 1.5°C.

Um das conclusões mais importantes que se retira deste estudo paramétrico, é que a perda de calor por radiação não provoca alterações significativas no campo térmico do betão. Para o modelo em causa, mesmo considerando processos construtivos que sejam mais desfavoráveis, a perda de calor por radiação não é determinante.

4.5. CONCLUSÕES GERAIS

A partir dos diversos estudos realizados neste capítulo foi possível retirar conclusões muito importantes sobre a influência dos diversos parâmetros considerados.

Como seria de esperar o processo construtivo influencia as temperaturas atingidas pelo betão, uma vez que este provoca alterações consideráveis na temperatura de estabilização durante as primeiras idades.

A temperatura inicial do betão é sem dúvida um dos mais importantes aspetos e condiciona fortemente o campo térmico. No entanto, nem sempre é possível arrefecer o betão a temperaturas como as estimadas nestas análises. Em empreendimentos muito grandes, como por exemplo as barragens, em que as quantidades de betão utilizadas são muito elevadas, é difícil conseguir manter todos os agregados do betão a temperaturas baixas, sendo que muitas vezes estes encontram-se expostos ao sol.

A utilização de cinzas volantes e de diferentes teores de cimento revela alterações significativas nas temperaturas atingidas pelo betão. Esta poderá ser sem dúvida uma boa solução, caso se verifique a ocorrência de fendilhação no modelo do pilar de descarregador de cheias.

A consideração da perda de calor por radiação revelou-se pouco importante, sem consequências relevantes. Por outro lado, a temperatura ambiente é determinante, sendo que a necessidade de utilizar uma senoide de temperaturas em vez de arbitrar uma temperatura constante, apenas tem repercussões ao nível do campo térmico do betão nas camadas superficiais, em que se fazem sentir mais acentuadamente as oscilações térmicas do ar.

A partir dos estudos paramétricos verificou-se também que é indispensável a consideração da radiação solar em dias de Verão, visto que provoca alterações significativas nas temperaturas atingidas pelo betão. Nas camadas superficiais, este fenómeno é ainda mais importante, seja qual for a estação do ano. Logo, é sem dúvida importante considerar a radiação solar, porque vai provocar alterações nas tensões do betão durante o processo construtivo.

5

CASO DE ESTUDO - PILAR DE UM
DESCARREGADOR DE CHEIAS

5.1. CASO DE ESTUDO

O presente trabalho tem como principal objetivo o estudo termo-mecânico durante a fase construtiva dos pilares de um descarregador de cheias pertencente a uma barragem que se encontra em construção. Este estudo consiste na realização de um conjunto de análises que permitam determinar a exequibilidade do processo construtivo adotado, de acordo com as propriedades do betão previsto, estimando o estado de tensão instalado antes da aplicação do pré-esforço. Como tal, é necessário determinar o campo de temperaturas gerado pelas reações de hidratação do cimento e, consequentemente, as tensões geradas no betão devido a essas elevações de temperatura nas primeiras idades.

5.1.1. LOCALIZAÇÃO

Os pilares em análise pertencem ao descarregador de cheias do Aproveitamento Hidroelétrico de Ilisu, Turquia (Fig.5.1). A latitude de Ilisu é 37.53° , tendo sido este o valor adotado no capítulo 4 para as análises relativas à radiação solar.



Fig.5.1 - Localização geográfica do caso de estudo

A temperatura média neste local é cerca de 18°C. No entanto, verificam-se elevadas amplitudes térmicas ao longo do ano, podendo atingir temperaturas de 40°C no Verão e menos de 0°C no Inverno. É ainda importante referir que o empreendimento encontra-se numa zona árida e seca, muito exposta à radiação solar.

5.1.2. CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DOS PILARES

O descarregador de cheias em estudo é constituído por uma soleira descarregadora, com uma largura total de 140m, dividida por juntas em 7 blocos de 20m de largura, cada um. No centro de cada um destes blocos emerge um pilar. Estes pilares têm a função de apoiar as 6 comportas segmento e têm uma geometria muito idêntica. Logo, é razoável o estudo de apenas um, de modo a obter resultados que sejam representativos para qualquer pilar do descarregador.

O pilar do descarregador de cheias é na realidade uma lâmina de betão com 4m de espessura e um comprimento total de 40m. A espessura do pilar já tinha sido referida no capítulo 4, já que esta foi tida em conta na realização do Modelo Base. Na Fig.5.2 apresenta-se uma planta parcial do descarregador de cheias.

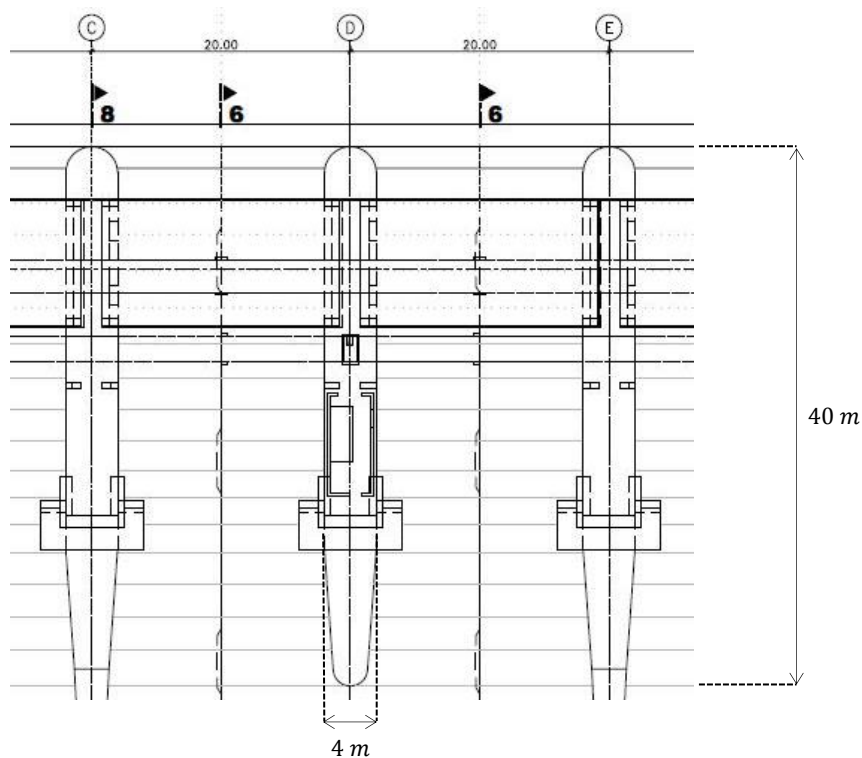


Fig.5.2 - Pilares do descarregador de cheias (vista de cima)

5.2. MODELO DO PILAR DO DESCARREGADOR DE CHEIAS

Através do *software* DIANA realizou-se um modelo 2D representativo de um corte transversal do pilar do descarregador de cheias. Na Fig.5.3 ilustra-se a localização do corte A-A' analisado. Este modelo deverá conter a variação da altura das camadas, uma vez que o processo construtivo do pilar prevê a betonagem de camadas com diferentes espessuras. O objetivo passa por caracterizar, da melhor maneira possível, o processo construtivo do pilar de descarregador de cheias utilizando para o efeito um modelo 2D em estado plano de deformação.

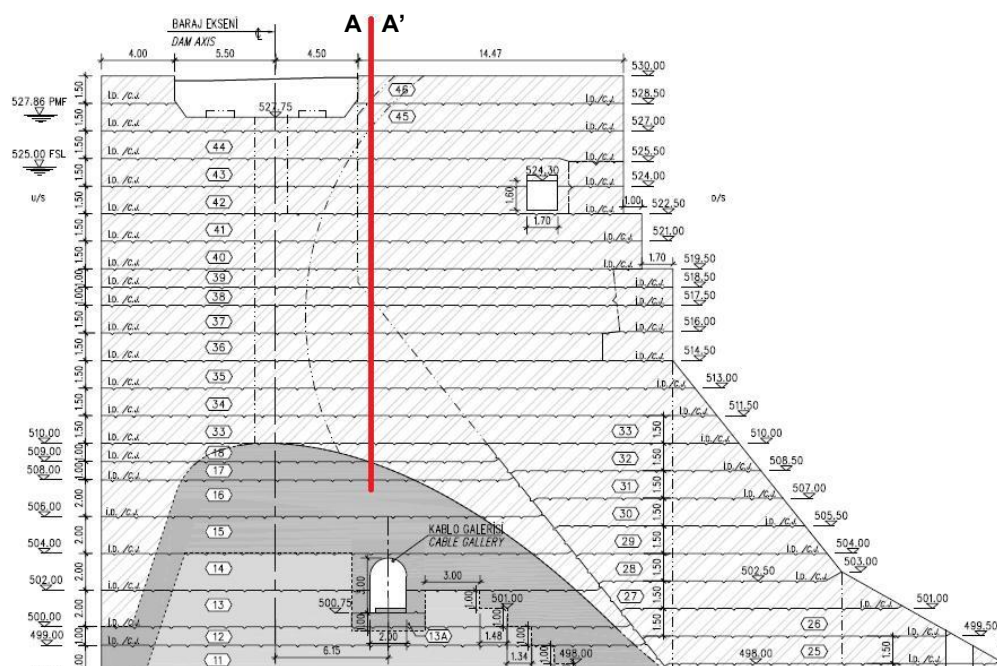


Fig.5.3 - Pilar de descarregador de cheias (corte longitudinal) e localização do corte AA`

5.2.1. PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

5.2.1.1. Características gerais

O betão previsto para a construção do pilar de descarregador de cheias é um C30/37 com 370Kg/m^3 de cimento, ao qual está associado a curva adiabática exposta no capítulo 4, Fig.4.3. Na Tabela 4 estão expostas todas as características deste betão necessárias à realização das análises termo-mecânicas, sendo que os diferentes valores estão de acordo com as referências expostas ao longo deste trabalho nos vários capítulos.

Tabela 4 - Propriedades do betão do pilar de descarregador de cheias

Massa volúmica	ρ	2600 Kg.m^{-3}
Capacidade calorífica	ρc	$2.16 \cdot 10^6 \text{ J.m}^3.\text{K}^{-1}$
Condutibilidade térmica	k	$2.1 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
Coeficiente de Poisson	ν	0.2
Coeficiente de dilatação térmica	α	$12 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
Módulo de elasticidade (t=28 dias)	E_{cm}	33 GPa
Resistência à tração (t=28 dias)	f_{ctm}	2.9 MPa
Curva adiabática	$T(t)$	Fig.4.3
Coeficiente de convecção-radiação (t<5 dias)	h_{eq}	$4.19 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
Coeficiente de convecção-radiação (t≥5 dias)	h_{cr}	$21.6 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
Constante de Arrhenius	E_a/R	5000 K

A evolução do módulo de elasticidade e da resistência à tração deste betão foram determinadas de acordo com o método da idade equivalente (ver Fig.5.4 e Fig.5.5).

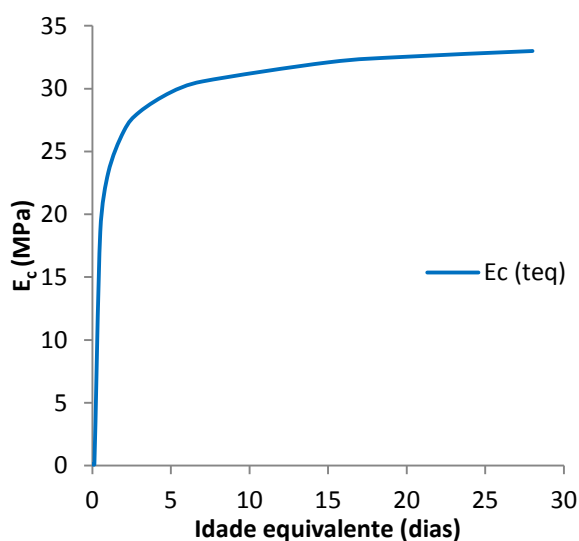


Fig.5.4 – Evolução do módulo de elasticidade

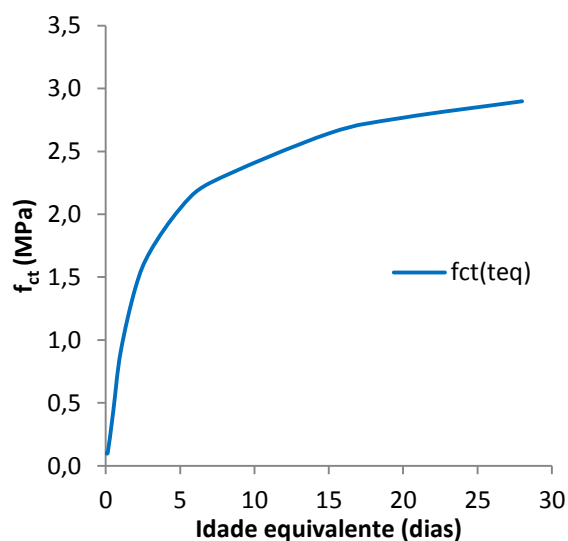


Fig.5.5 – Evolução da resistência à tração

O pilar assenta precisamente no descarregador de cheias, que por sua vez é constituído por outro betão. A Tabela 5 expressa as diferentes propriedades desse betão.

Tabela 5 - Propriedades do betão do descarregador de cheias

Massa volúmica	ρ	2600	Kg.m^{-3}
Capacidade calorífica	ρc	$2.16 \cdot 10^6$	$\text{J.m}^{-3}.\text{°K}^{-1}$
Condutibilidade térmica	k	2.1	$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
Coeficiente de Poisson	ν	0.2	
Coeficiente de dilatação térmica	α	$12 \cdot 10^{-6}$	K^{-1}
Módulo de elasticidade	E_{cm}	25	GPa
Coeficiente de convecção-radiação	h_{cr}	21.6	$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$

5.2.1.2. Fluência

No presente caso de estudo foi apenas considerada a fluência básica, através da lei da dupla potência exposta no capítulo 2. Como já tinha sido referido, para o estudo do betão nas primeiras idades é razoável desprezar a fluência de secagem, porque só tem influência nas camadas superficiais do betão.

Não havendo resultados experimentais para a calibração dos parâmetros de fluência foi necessário fazer uma pesquisa sobre estes parâmetros. Foram obtidos os conjuntos de parâmetros A e B com referências bibliográficas (Azenha, M. [et al.], 2014) e (Faria, R. [et al.], 2006), respetivamente.

Tabela 6 - Conjuntos de parâmetros para a lei da dupla potência (t em dias)

	ϕ_l	m	n
Conjunto A	2.15	0.48	0.19
Conjunto B	2.26	0.35	0.3

Estes conjuntos serão utilizados nas análises mecânicas, de forma a verificar a variação do campo de tensões obtidos consoante os parâmetros de fluência utilizados.

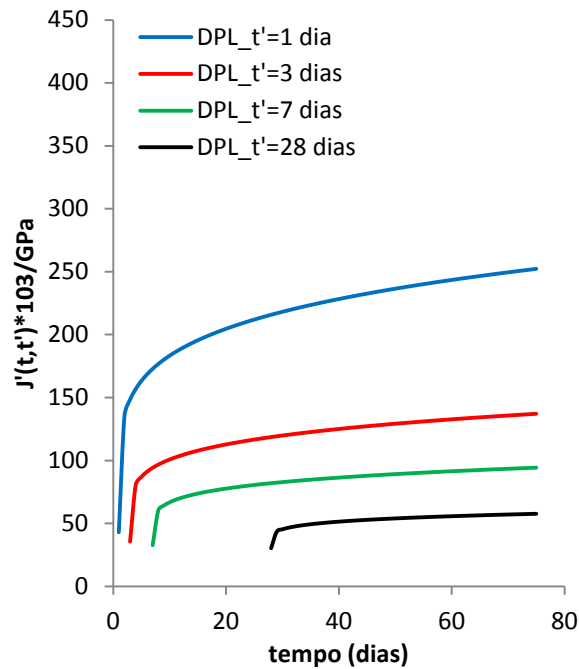


Fig.5.6 - Lei da dupla potência (Conjunto A)

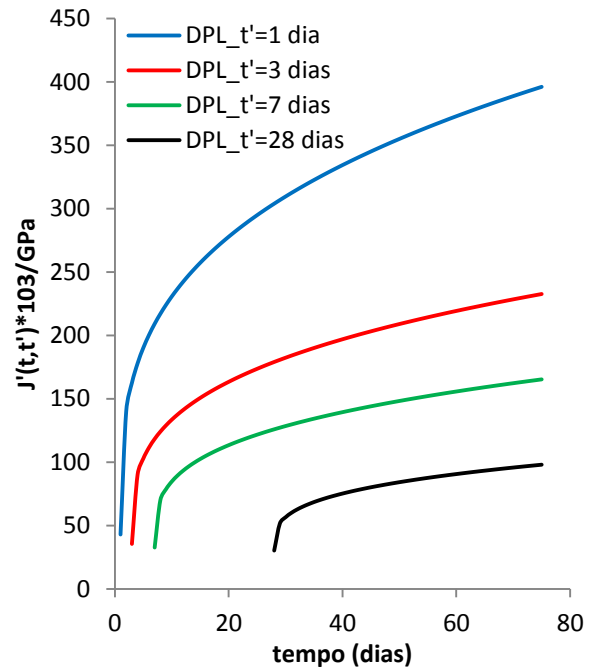


Fig.5.7 - Lei da dupla potência (Conjunto B)

5.2.1.3. Retração

O fenómeno da retração também pode provocar o aparecimento de fendas de forma prematura.

O betão utilizado para o pilar de descarregador de cheias contém um elevado teor de cimento, logo a retração autogénica poderá ser a parcela deste fenómeno com maior importância.

No entanto, a retração de secagem poderá ter algum significado devido à geometria do pilar, nomeadamente nas camadas mais superficiais. Tendo em consideração que o pilar tem uma largura de apenas 4m e que esta parcela da retração está diretamente ligada à perda de água para o exterior, é razoável admitir que este fenómeno possa ser relevante para a quantificação do estado de tensão do betão mais próximo das faces.

Contudo, para prever com maior rigor estes fenómenos seria necessário um modelo de cálculo para o campo de humidades no interior no betão. Para além disso, considerando que se está a analisar as primeiras idades, decidiu-se que o fenómeno da retração vai ser desprezado no âmbito deste trabalho.

5.2.2. CONDIÇÕES FRONTEIRA DO MODELO

Para o modelo final do pilar de descarregador de cheias considerou-se a perda de calor por convecção e radiação em todas as superfícies do betão em contacto com o ar. Tal como exposto no capítulo 4, foi considerado um coeficiente h_{cr} de $21.6 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$. Nos estudos paramétricos realizados verificou-se que a perda de calor por radiação era praticamente desprezável, mesmo adotando processos construtivos mais desfavoráveis. No entanto, como o tempo de análise para o modelo do pilar é consideravelmente mais longo, é razoável admitir a sua existência.

Nas superfícies laterais das camadas foi considerado o efeito da cofragem nos primeiros 5 dias após a betonagem da camada. Logo, a partir da equação (2.25) e admitindo que a cofragem é em madeira, com um valor de condutibilidade térmica k igual a $0.13 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ e com uma espessura e de 25mm obtém-se:

$$h_{eq} = \left(\frac{1}{21.6} + \frac{0.025}{0.13} \right)^{-1} = 4.19 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1} \quad (5.1)$$

5.2.3. AÇÕES

De forma a determinar da forma mais correta possível as temperaturas e as correspondentes tensões no betão nas primeiras idades é necessário definir as ações que têm maior impacto para este estudo. O peso próprio da estrutura, bem como a variação da temperatura ambiente exterior têm que ser consideradas neste modelo.

5.2.3.1. Peso próprio do betão

A partir das características gerais anteriormente apresentadas, verifica-se a utilização de 2600 Kg/m^3 , como o valor da massa volúmica do betão.

É importante referir que se considerou um valor inicial para o módulo de elasticidade do betão de 0.1 GPa (Fig.5.4). De forma a garantir a fiabilidade dos resultados obtidos, uma vez que o peso próprio atua logo no instante inicial da análise, é necessário considerar uma rigidez inicial, que minimize os valores iniciais de deslocamentos.

5.2.3.2. Sinusoide da temperatura média mensal

A consideração de uma sinusoide da temperatura média mensal é fundamental para a correta determinação do campo térmico do betão, pois tal como verificado no capítulo 4, as diferenças de betonar em condições de Verão e Inverno são consideráveis. Foram realizadas análises para 4 meses, em que os primeiros 2.5 correspondem à betonagem do pilar, e o restante tempo de análise serve apenas para analisar o ritmo de dissipação do calor e a evolução das tensões.

A partir dos estudos paramétricos realizados verifica-se que a radiação solar assume uma importância significativa em dias de Verão. A sua consideração é fundamental na realização do modelo final do pilar, requerendo assim uma estratégia para a sua consideração. Optar por considerar a radiação solar como um fluxo de calor nas diversas superfícies do modelo final é uma solução muito trabalhosa e pouco prática, visto que este modelo é constituído por 15 camadas. Logo, optou-se por uma típica solução de projeto, que consiste no aumento da temperatura ambiente, de modo a compensar a variação térmica do betão provocada pela radiação solar.

Atendendo às conclusões retiradas nos estudos paramétricos do capítulo 4 verificou-se que em dias de Verão com céu limpo, a temperatura atingida pelo betão no centro da camada é superior, em cerca de 3°C , às temperaturas atingidas num dia de Verão em que não se considera a radiação solar. Verificou-se que para diminuir essa diferença para 2°C é necessário aumentar a temperatura ambiente em 3°C .

Esta tentativa de adquirir sensibilidade relativamente à variação da temperatura no betão, através da consideração da radiação solar como um aumento da temperatura ambiente, permitiu encontrar uma solução relativamente simples. Optou-se por fazer uma modificação na curva média mensal de

temperaturas, aumentando em 3°C a temperatura no mês de junho e mantendo constante a temperatura em janeiro.

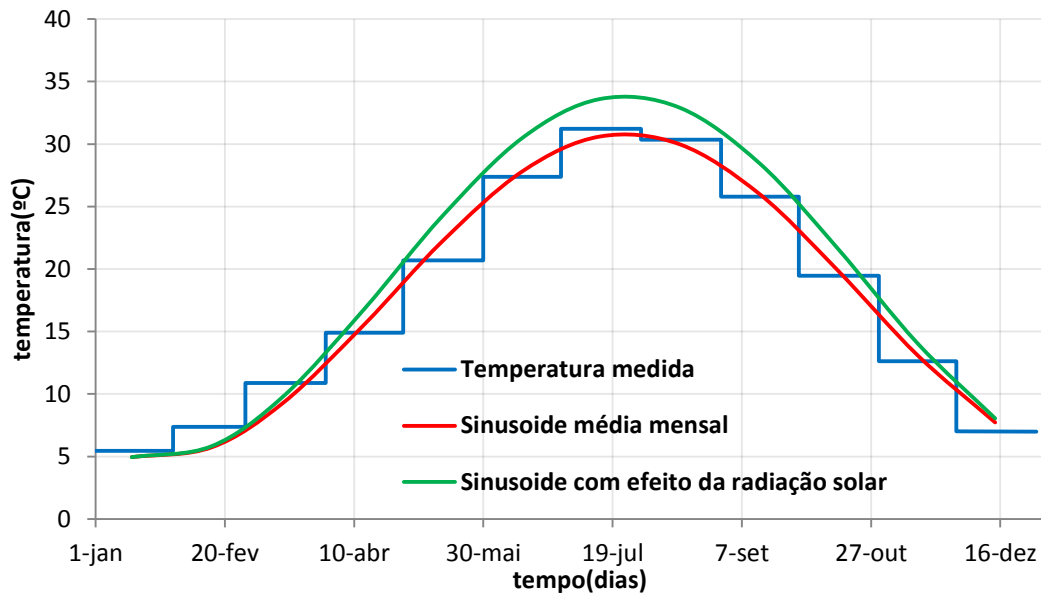


Fig.5.8 - Temperatura média mensal

O gráfico da *Temperatura medida* representa a temperatura média mensal medida nas imediações do local. Na Tabela 7 constam os parâmetros das sinusoides apresentadas na Fig.5.8, que foram adotados na aplicação da equação (4.2).

Tabela 7 - Parâmetros para as sinusoides de temperatura ambiente

	T_m (°C)	A (°C)	ω (1/dia)	t_{T_m} (dias)
Sinusoide média mensal	17.8	13	0.0172	115
Sinusoide com efeito da radiação solar	19.3	14.5	0.0172	115

Uma outra solução, para ter em consideração o efeito da radiação solar, poderia passar por coincidir as temperaturas do betão obtidas na análise BASE_SinVerão_qs1 com as atingidas na análise BASE_Verão. No entanto, seria necessário aumentar a temperatura ambiente em cerca de 10°C. Esta solução não é sensata, porque nem todos os dias de Verão são de céu limpo. Além disso, no modelo base, onde foram realizados estes estudos paramétricos, não se considerou perda de calor por convecção nas superfícies laterais da camada.

5.2.3. APRESENTAÇÃO DO MODELO

O modelo do pilar é constituído por 15 camadas com 4m de largura, sendo a 1ª, 7ª e 8ª de 1m de altura e as restantes de 1.5m, correspondendo deste modo a uma altura total de 21m. O ritmo de betonagem adotado consiste em 5 dias de espera entre camadas, independentemente da altura destas.

Na Fig.5.9 encontra-se representado a laranja a geometria do pilar e a azul um bloco com 20x20m, que representa o betão do descarregador de cheias, sendo que a largura de 20m está diretamente relacionada com distância entre juntas.

As condições de apoio consideradas apenas restringem os movimentos horizontais e verticais na base do bloco de betão (representadas a vermelho na Fig.5.9). As superfícies laterais deste bloco não estão restringidas, uma vez que estas representam a localização das juntas. Como tal, são superfícies livres de sofrer movimentos nas direções x e y.

Na Fig.5.10 está representada a malha de elementos finitos adotada para o pilar.

Para a análise mecânica, estes elementos são constituídos por 8 nós (CQ16E), sendo que para a análise térmica o *software* converte-os diretamente em elementos finitos de 4 nós (Q4HT). Foram ainda utilizados elementos de 2 nós (B2HT) para as superfícies em contacto com o ar.

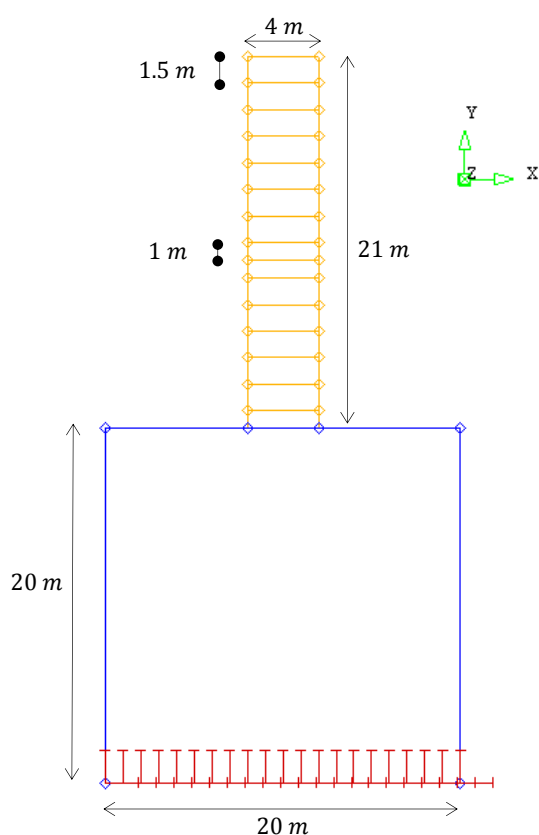


Fig.5.9 – Geometria do pilar de descarregador de cheias e respetivas condições de apoio

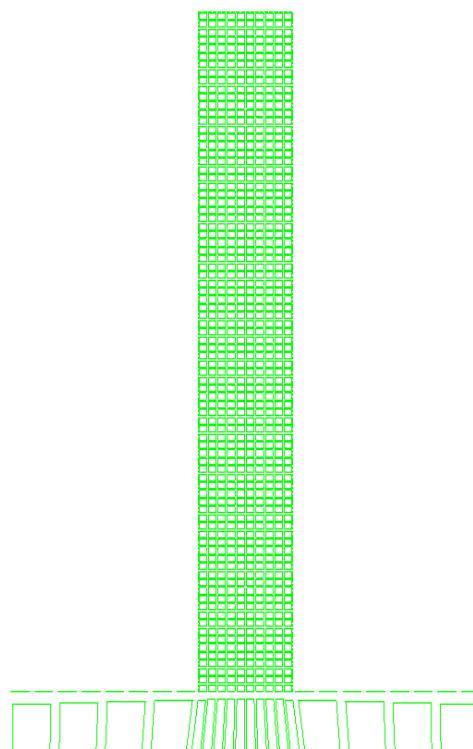


Fig.5.10 – Malha de elementos finitos do pilar de descarregador de cheias

5.3. ANÁLISES TERMO-MECÂNICAS

Para esta apresentação de resultados, optou-se por um estudo individualizado de uma camada representativa do modelo, bem como um estudo mais geral, recorrendo a mapas de tensões e temperaturas para as situações que foram consideradas mais relevantes.

Tendo sido escolhida a nona camada como sendo a mais representativa, à semelhança do que foi realizado no capítulo 4, escolheram-se desta vez 4 pontos para analisar o comportamento térmico e mecânico do betão. Visto que a maior preocupação reside na obtenção de resultados fiáveis de tensões,

optou-se por analisar diretamente os resultados nos pontos de Gauss. Tendo sido para isso escolhidos, o elemento e o ponto de Gauss, que melhor representam as zonas sinalizadas a vermelho (ver Fig.5.11).

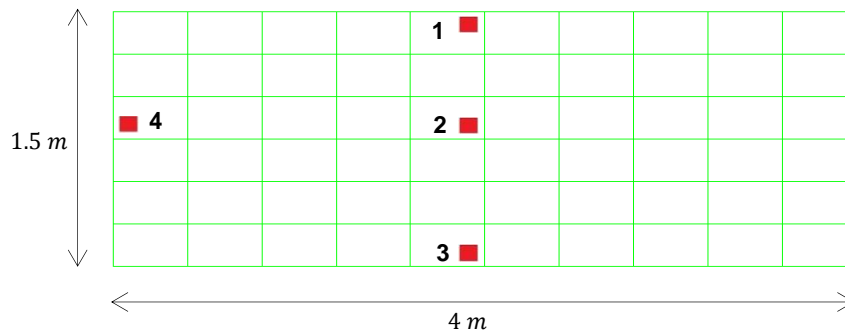


Fig.5.11 – Camada de betão e respetivas zonas de análise

Nas presentes análises, as zonas assinaladas a vermelho na Fig.5.11, passarão a ser designados por:

- 1 – topo da camada
- 2 – meio da camada
- 3 – base da camada
- 4 – superfície lateral da camada

5.3.1. ANÁLISE DE REFERÊNCIA

Para a elaboração de uma análise de referência foi necessário adotar os seguintes pressupostos:

- Início da betonagem no Verão: 1 de julho
- Temperatura inicial do betão fresco aquando da betonagem: 15°C
- Temperatura inicial do betão do descarregador de cheias: 33°C (temperatura média de julho)
- Parâmetros para a lei da dupla potência: Conjunto A
- Tempo de espera entre betonagens: 5 dias

Como tal, de acordo com estas condições e com tudo o que foi definido anteriormente, obtiveram-se resultados de tensões σ_x , σ_y e σ_z , bem como as temperaturas atingidas pelo betão.

5.3.1.1. Análise térmica

De acordo com a Fig.5.12, as temperaturas atingidas pelo betão estão em concordância com aquilo que seria expectável, tendo em conta os resultados obtidos no capítulo 4 para um típico dia de Verão.

No entanto, para o modelo do pilar de descarregador de cheias, verifica-se que estas começam a diminuir, no momento em que se atinge a temperatura máxima, não havendo estabilização da temperatura durante um período de tempo. Tal acontece, porque se está a considerar que as superfícies laterais perdem calor por radiação e convecção, sendo sem dúvida determinante para um arrefecimento mais rápido do betão, seja qual for a zona em análise da camada.

A temperatura máxima atingida pelo betão ocorre aos 2.5 dias e assume um valor de 56.4°C. Como seria de esperar esta temperatura é atingida no meio da camada. Posteriormente a temperatura decresce e começa a estabilizar. Em estruturas de betão em massa, em fase de projeto é muitas vezes definido que a temperatura máxima não deve exceder a temperatura de estabilização (igual à temperatura média anual do ar) entre 20°C a 25°C, conforme se trate de um betão mais pobre ou mais rico em cimento. Neste caso, esse limite é claramente excedido. Isso faz antever problemas relacionados com a fissuração devida ao arrefecimento lento e gradual do pilar até à temperatura de equilíbrio.

É interessante verificar que, para a curva de temperaturas referente à superfície lateral da camada, atinge-se temperaturas um pouco acima dos 50°C. No entanto, o betão arrefece e sofre uma descida abrupta aos 5 dias, porque são retiradas as cofragens. Há sem dúvida um choque térmico, que poderá ter consequências ao nível dos resultados obtidos para as tensões. Posteriormente, o betão arrefece e tende para a temperatura ambiente.

Muitas vezes é necessário respeitar uma diferença máxima entre temperaturas na camada de betão. Para a análise de referência, esta atinge no máximo 23.5°C (diferença de temperatura entre o meio e o topo da camada). Sabendo que um limite usual para esta diferença máxima entre temperaturas ronda o valor de 20°C (ao longo de 1.5m), é possível afirmar que esta especificação de projeto não é respeitada.

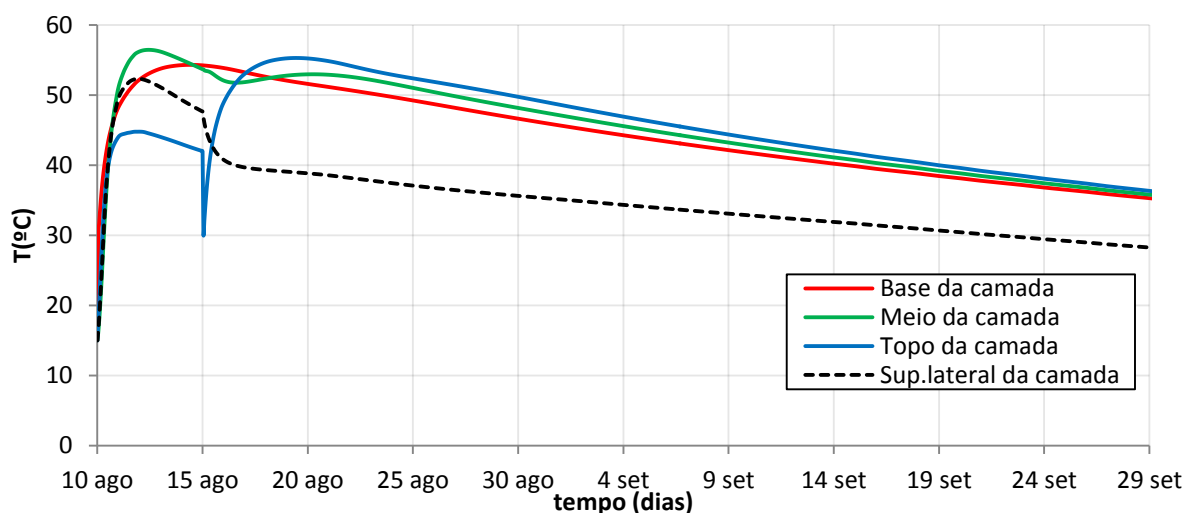


Fig.5.12 - Temperatura do betão na 9ª camada: Análise de Referência

A partir dos mapas de temperatura apresentados (anexo A1), verificamos a evolução da temperatura do pilar ao longo do processo construtivo.

É clara a influência da consideração da perda de calor pelas superfícies laterais, que determina um arrefecimento nestas superfícies mais rápido, mantendo-se as temperaturas máximas no centro do betão da última camada betonada.

Os mapas de temperaturas presentes no anexo A1 representam o campo de temperaturas do betão a partir da betonagem da nona camada até ao fim da análise. É possível verificar que 120 dias após o início da betonagem do pilar, as temperaturas do betão ainda não são uniformes. No entanto, já tendem para os valores da temperatura ambiente, que tendo em conta o instante da análise, corresponde à temperatura ambiente do mês de Outubro (20-25°C).

5.3.1.2. Análise mecânica

- **Análise das tensões na direção x**

Primeiramente, analisando as tensões σ_x (Fig.5.13), verifica-se que nos gráficos referentes ao meio e base da camada, a ocorrência de fendilhação é muito improvável.

Particularizando para o meio da camada, verifica-se a partir do estudo da curva de tensões σ_x associada uma estabilização dos valores de tensão em 0.45MPa (compressão) a partir dos 15 dias (25 de agosto). No entanto, ocorrem tensões de tração entre os 6 e os 9 dias, sendo o valor máximo registado de 0.47MPa por volta dos 7 dias (17 de agosto).

Uma análise semelhante na base da camada permite verificar a inexistência de tensões de tração no betão. Aos 5 dias (15 de Agosto) verifica-se uma tensão máxima de 3.22MPa (compressão), e uma estabilização desta a partir dos 12 dias (22 de Agosto), no valor de 2.34MPa.

No estudo da superfície lateral, verifica-se que o betão encontra-se sujeito a tensões σ_x praticamente nulas durante todo o processo construtivo, tal como seria de esperar em face das condições de apoio.

A curva de tensões σ_x associada ao topo da camada permite verificar a existência de elevadas tensões de tração. Antes de betonar outra camada aos 5 dias, verifica-se que betão já atingiu tensões de 5.13MPa (tração).

É importante referir que há uma variação brusca de tensão no momento da betonagem da seguinte camada. Esta situação particular é independente da fluência, uma vez que esta variação de tensão é instantânea. Posteriormente, as tensões no betão tendem a estabilizar a partir dos 16 dias (26 de Agosto), para valores de tração à volta de 5MPa. Logo, é praticamente certo que a fendilhação superficial irá ocorrer.

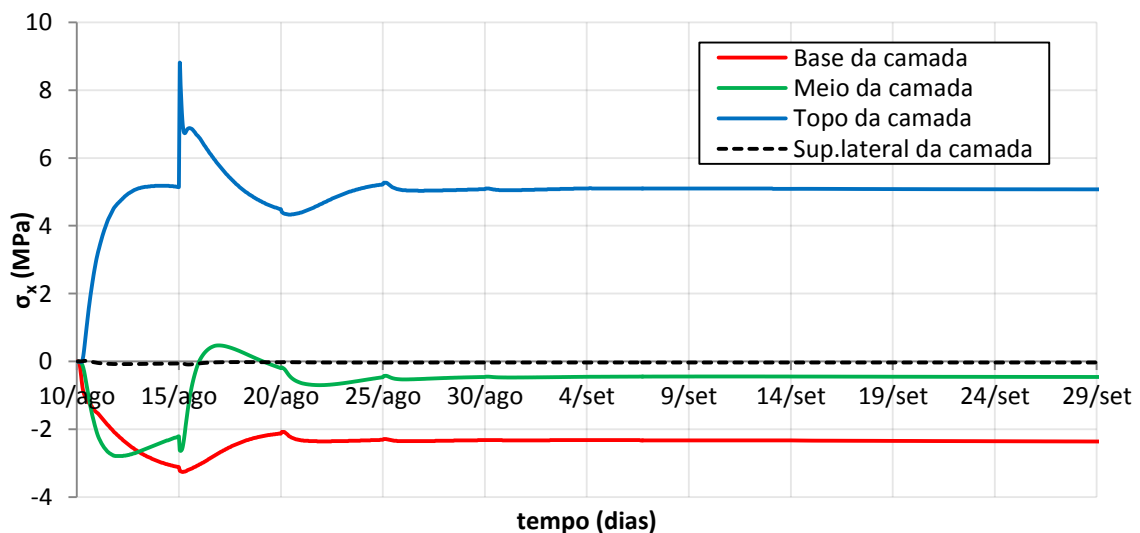


Fig.5.13 – Tensões σ_x na 9ª camada de betão: Análise de Referência

De acordo com os gráficos obtidos para as tensões σ_x , é interessante observar os resultados do anexo A1, que representam mapas das tensões na direção x para os momentos mais oportunos.

Através do anexo A1 é possível verificar a evolução das tensões σ_x do pilar, ao longo de parte do processo construtivo (a partir da betonagem da nona camada). No instante inicial da betonagem da nona camada, as tensões observadas nesta são nulas. No entanto, passados 5 dias após a betonagem da

nona camada (45 dias após betonagem da primeira) já se verifica a existência de trações elevadas no topo da camada.

É também possível observar que o betão encontra-se comprimido no centro, e que nas faces laterais as tensões são praticamente nulas. Na direção x, o betão na superfície lateral não está restringido, logo sofre deslocamentos nesta direção sem consequências para o estado de tensão.

Passados 7 dias da betonagem da nona camada (47 após a betonagem da primeira), verifica-se que, as tensões de tração existentes no topo desta começam a alastrar para o centro. No entanto, não atingem valores significativos, pois tal como já foi referido, quando se analisaram os gráficos da Fig.5.13, o betão no meio da camada não atinge tensões de tração superiores a 0.47MPa (por volta dos 7 dias).

• Análise das tensões na direção y

Analisando agora as tensões σ_y (ver Fig.5.14), verifica-se a existência de trações significativas na superfície lateral da camada. Nesta zona, o betão atinge tensões de tração de 2.7MPa aos 2.5 dias. Para além disso, há um pico de tensão aos 5 dias de 3.27MPa (tração), devido à betonagem da camada sobrejacente. Atendendo às propriedades evolutivas do betão nas primeiras idades é necessário considerar a hipótese do aparecimento de fendas nesta superfície devido a tensões σ_y .

Relativamente às restantes zonas em análise, verifica-se a existência de baixas tensões de trações no betão, que aparentemente não são preocupantes. Seja na base, meio ou topo da camada verificam-se tensões muito semelhantes, que até aos 15 dias (25 de agosto) assumem no máximo valores de 0.65MPa.

É interessante verificar que para estas zonas (topo, meio e base), o efeito da betonagem de camadas de 5 em 5 dias comprime claramente o betão, anulando as pequenas trações sofridas anteriormente.

No entanto, a partir dos 20 dias esse efeito provocado pelo processo construtivo, deixa de ser determinante na variação instantânea destas tensões. A partir dessa idade, o betão começa a apresentar maiores valores para tensões de tração, mas sempre abaixo dos 2MPa.

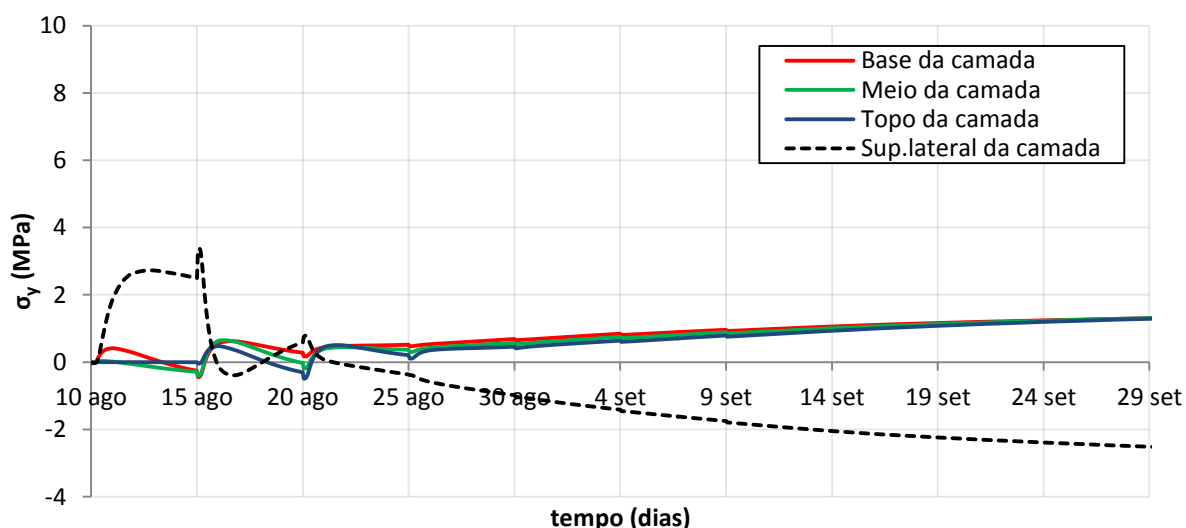


Fig.5.14 - Tensões σ_y na 9ª camada de betão: Análise de Referência

Os mapas de tensões σ_y apresentados no anexo A1 permitem validar as conclusões anteriormente apresentadas.

Verifica-se claramente, que estas tensões assumem valores de tração nas superfícies laterais durante os primeiros 5 dias, que até poderão causar fendilhação. Esta situação deve-se à existência de fortes gradientes térmicos entre esta superfície e o ar. No entanto, posteriormente a essa data, o betão tende claramente a comprimir nessa zona, tal como é possível verificar nas camadas subjacentes à que se encontra em análise.

Ao mesmo ritmo que isto acontece, o betão que se encontra no centro da camada, que inicialmente assumia valores de tensões de tração muito baixos, tende a tracionar mais com o decorrer do tempo assumindo valores entre 1.5 e 2MPa. Esta situação deve-se às elevadas temperaturas do betão nas zonas mais interiores da camada e ao facto das extremidades laterais já terem perdido grande parte do calor de hidratação e já se encontrarem comprimidas.

- **Análise das tensões na direção z**

Relativamente às tensões σ_z (Fig.5.15), verifica-se um comportamento mais homogéneo do campo de tensões da camada em análise. Aparentemente as tensões de tração são inevitáveis nesta direção, seja qual for a zona em análise da camada. Inicialmente a camada de betão encontra-se comprimida na sua totalidade, mas conforme o betão vai arrefecendo, vão aparecendo trações.

A superfície lateral começa a tracionar mais cedo do que as restantes zonas do betão, porque é a zona da camada que se encontra em contacto com o ar, sujeita a um forte gradiente térmico.

É importante também analisar a evolução do campo de tensões σ_z após a betonagem de uma nova camada aos 5 dias. As tensões na base da camada não parecem ser influenciadas pela betonagem desta. No meio da camada há uma ligeira perturbação do valor das tensões, que resulta numa pequena descompressão do betão nessa zona. No topo da camada, atingem-se tensões de tração de 2MPa aos 5 dias, algo que deverá ser examinado mais ao pormenor na apresentação do risco de fendilhação.

Relativamente à superfície lateral, verifica-se que a partir dos 28 dias (5 de setembro), o betão começa a tracionar nesta superfície e apresenta uma tendência para atingir valores de tração cada vez maiores.

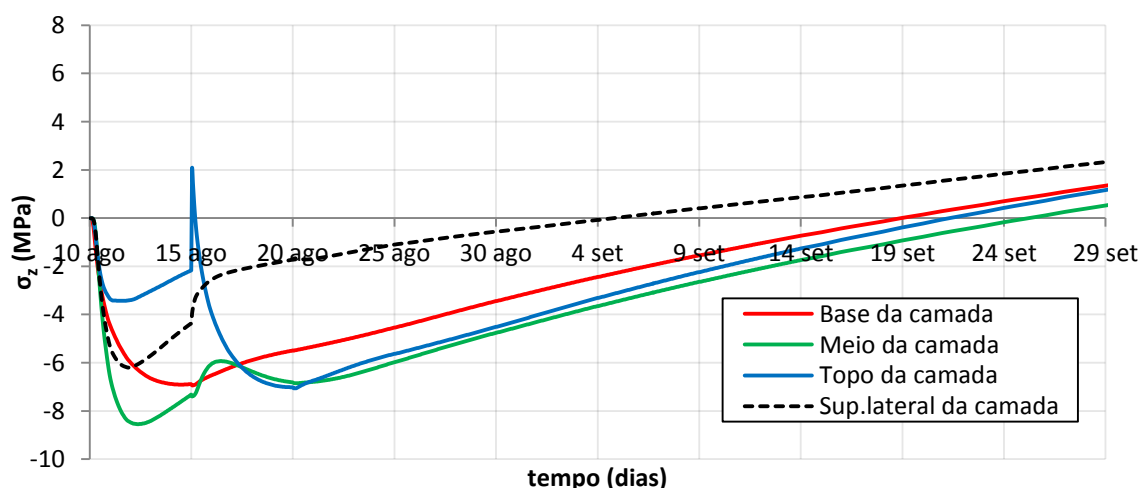


Fig.5.15 – Tensões σ_z na 9ª camada de betão: Análise de Referência

A partir dos mapas de tensões σ_z (ver anexo A1) permite acrescentar, que o aparecimento de tensões de tração nesta direção vai agravando conforme o tempo de análise. Verifica-se claramente que o betão começa a tracionar nas superfícies laterais, sendo que, com o decorrer do tempo de análise essas tensões de tração começam a aparecer em zonas mais interiores do betão.

5.3.1.3. Risco de fendilhação

O *software* DIANA permite determinar diretamente índices de fendilhação, que possibilitam averiguar o aparecimento de fendas no betão. A expressão (5.2) define um desses índices de fendilhação.

$$F_{tu}(t) = \frac{\sigma_I(t)}{f_{ct}(t)} \quad (5.2)$$

em que,

$f_{ct}(t)$ – resistência à tração do betão para o instante t

$\sigma_I(t)$ – tensão principal máxima no instante t

Para casos em que $\sigma_I(t) < 0$, ou seja, para tensões de compressão, o DIANA fornece o valor nulo para este índice. É verificável que para valores de $F_{tu} \geq 1$, a probabilidade de aparecimento de fendas é elevada. Nestes casos, a tensão principal máxima no betão é igual ou superior à resistência à tração deste, para aquele instante em análise.

Tendo em conta este índice de fendilhação e os resultados obtidos para as tensões na direção x, y, z, bem como a análise térmica apresentada, são agora expostas algumas conclusões acerca do risco de fendilhação do betão. Atendendo aos resultados expostos no anexo A1, é conclusivo que o aparecimento de fendas no topo e na superfície lateral da camada é praticamente inevitável, de acordo com as considerações adotadas para a análise de referência.

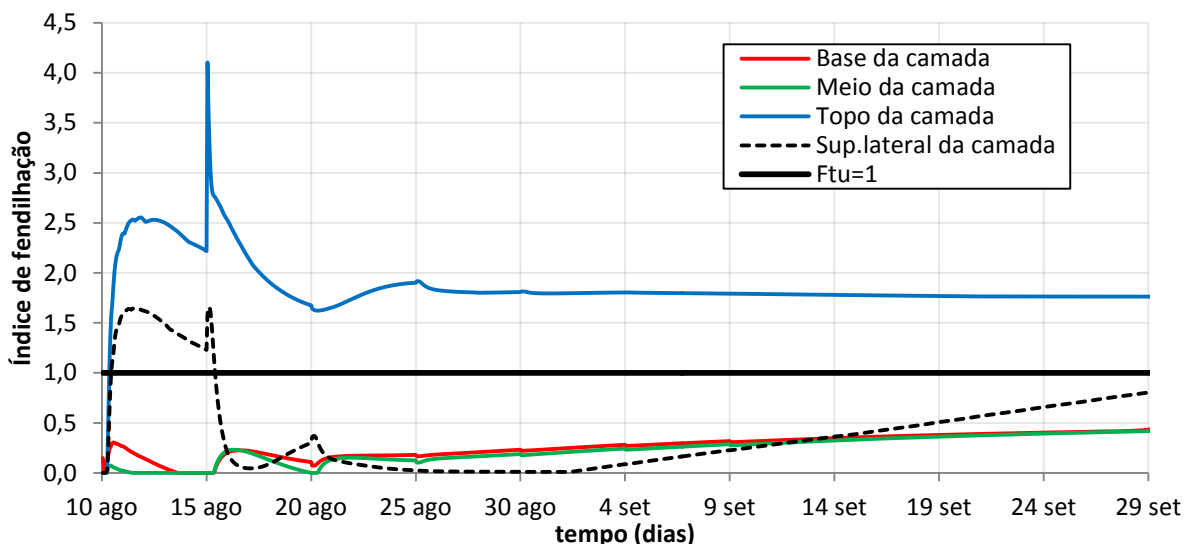


Fig.5.16 - Índice de fendilhação na 9ª camada: Análise de Referência

Em concordância com tudo o que foi exposto relativamente à análise das tensões na direção x, era expectável o aparecimento de fendas superficiais no betão, ou seja, no topo da camada. A Fig.5.16

permite retirar precisamente essa conclusão, uma vez que o betão nessa zona (topo da camada) atinge valores de índice de fendilhação superiores a 1, nas primeiras horas de análise.

Estas fendas aparecem devido à existência de um forte gradiente térmico entre a temperatura ambiente e a temperatura na superfície do betão, sendo que bastam apenas 9h de exposição para o aparecimento destas ($F_{tu} > 1$). Logo, a betonagem da camada adjacente não influencia o aparecimento destas fendas, porque o processo construtivo adotado para a betonagem do pilar de descarregador de cheias, não é o fator responsável por esta situação.

Sendo assim, espera-se o aparecimento de fendas verticais (na direção y) com desenvolvimento longitudinal (segundo a direção z) nos topos das camadas, devido às tensões de tração σ_x verificadas nesta zona.

Ao nível de danos estruturais este fenómeno não apresenta graves consequências, porque o meio da camada encontra-se sempre comprimido. Logo, as fendas que surgem no topo não conseguirão atravessar toda a camada até à base desta. Para além disto, ao betonar a camada seguinte, será expectável que o betão fresco preencha as fendas superficiais existentes na camada subjacente. Como tal, de acordo com os pressupostos adotados para esta análise de referência, o problema do aparecimento de fendas verticais devido às tensões σ_x , não apresentam graves preocupações ao nível de danos estruturais no betão.

Relativamente à superfície lateral da camada verifica-se um índice de fendilhação superior a 1, até aos 5 dias de idade. De acordo com as análises mecânicas anteriormente realizadas, conclui-se facilmente que tal situação deriva das elevadas tensões de tração σ_y sofridas pelo betão nessa zona. Contudo este índice volta a baixar a partir dos 5 dias, tal como estas tensões.

Logo, é razoável admitir o aparecimento de fendas horizontais (na direção x) com desenvolvimento longitudinal (direção z) junto às faces laterais do betão durante os primeiros 5 dias. No entanto, o betão voltará a comprimir juntos às faces laterais sendo razoável admitir que estas fendas voltem a fechar, devido às tensões de compressão σ_y que ocorrem nestas zonas do betão em idades mais avançadas.

Contudo, enquanto as tensões σ_y nas superfícies laterais tendem a assumir valores de compressão significativas, nas zonas mais interiores da camada começam a aparecer tensões de tração.

Devido às tensões σ_z , há probabilidade de aparecimento de fendas. Verifica-se na Fig.5.16, que as curvas associadas ao meio e base da camada vão-se aproximando de $F_{tu} = 0.5$. Este problema está associado às tensões para fora do plano, pois tal como se verificou anteriormente, as tensões σ_z no betão tendem a aumentar ao longo do tempo de análise em todas as zonas do betão. Tal situação explica também o facto de a curva do índice de fendilhação, associada à superfície lateral voltar a crescer a partir dos 23 dias.

O estudo das tensões σ_z traz preocupações associadas ao aparecimento de fendas em idades um pouco mais avançadas, porque estas tensões de tração tendem a aumentar com o tempo de análise.

No entanto, é necessário ter em consideração que existem armaduras no pilar, na direção z, junto às faces da camada. Logo, não são muito preocupantes as tensões de tração existentes nesta zona, uma vez que o correto dimensionamento desta armadura garantirá que as fendas verticais junto às faces laterais serão controladas. O eventual aparecimento de trações elevadas no meio do betão poderá ser mais preocupante. No entanto os pilares serão pré-esforçados na direção longitudinal (direção z), sendo que as tensões calculadas fornecem uma indicação acerca do calendário para a aplicação do pré-esforço, assim como permitem uma estimativa do pré-esforço necessário para mitigar o risco de fendilhação.

É necessário ter em linha de conta que este modelo 2D foi elaborado em estado plano de deformação, logo restringe por completo os deslocamentos em z (para fora do plano). Como tal, as tensões σ_z vão estar sempre sobrestimadas.

No anexo A1 identificam-se claramente as zonas onde a ocorrência de fendilhação é mais provável. Aos 45 dias identifica-se a ocorrência de fendilhação superficial na nona camada, nos topos e superfície lateral, tal como já tinha sido discutido. Sendo que posteriormente as superfícies laterais deixam de experimentar elevadas tensões de tração e o índice de fendilhação baixa, deixando apenas o problema de fendilhação nos topos das camadas de betão. No entanto, uma observação mais cuidada das camadas subjacentes permite identificar um crescimento deste índice no centro das camadas para valores entre 0.4 e 0.6.

5.3.2. BETONAGEM EM DIFERENTES ESTAÇÕES DO ANO

Para a análise de referência anteriormente apresentada optou-se pela betonagem no Verão. Contudo, é necessário ponderar outras situações, que permitam discernir qual será a melhor data para iniciar a betonagem do pilar de descarregador de cheias.

Na prática, os pilares serão betonados em datas diversas, dada a impossibilidade de proceder à sua betonagem em simultâneo. No entanto, é necessário assegurar a opção que garanta a melhor qualidade da estrutura, ou seja, a opção que garanta um menor risco de fendilhação.

No capítulo 4 já tinha sido focada a influência da temperatura ambiente no campo térmico do betão. Não só condiciona diretamente a ação imposta nas fronteiras da estrutura, como também condiciona a temperatura inicial com que o betão pode ser colocado. Sendo por isso um fator importantíssimo, que influencia certamente as tensões do betão nas primeiras idades.

Apresentam-se agora resultados para soluções de betonagem na Primavera, Outono e Inverno, de acordo com os pressupostos expostos na Tabela 8. Convém referir que, à semelhança do que foi realizado na análise de referência, adotou-se como temperatura inicial do betão da soleira do descarregador de cheias, a temperatura média do mês de início de betonagem. A temperatura inicial do betão fresco está de acordo com as especificações do projeto.

Tabela 8 - Betonagem em diferentes estações do ano

	Verão (A.R.*)	Primavera	Outono	Inverno
Data do início da betonagem	1 de julho	1 de abril	1 de outubro	1 de janeiro
Data do fim da betonagem	10 de agosto	10 de junho	10 de dezembro	12 de março
Temperatura inicial do betão na betonagem	15°C	15°C	10°C	10°C
Temperatura inicial do betão do descarregador	33.3°C	17.0°C	21.4°C	5.3°C
Parâmetros para a Lei da Dupla Potência	Conjunto A	Conjunto A	Conjunto A	Conjunto A

*A.R. – Análise de Referência

5.3.2.1. Análises térmicas

As análises térmicas ajudam a entender o comportamento da evolução das tensões no betão. No entanto, também permitem verificar se os limites máximos de temperaturas, bem como as diferenças máximas entre temperaturas são respeitados.

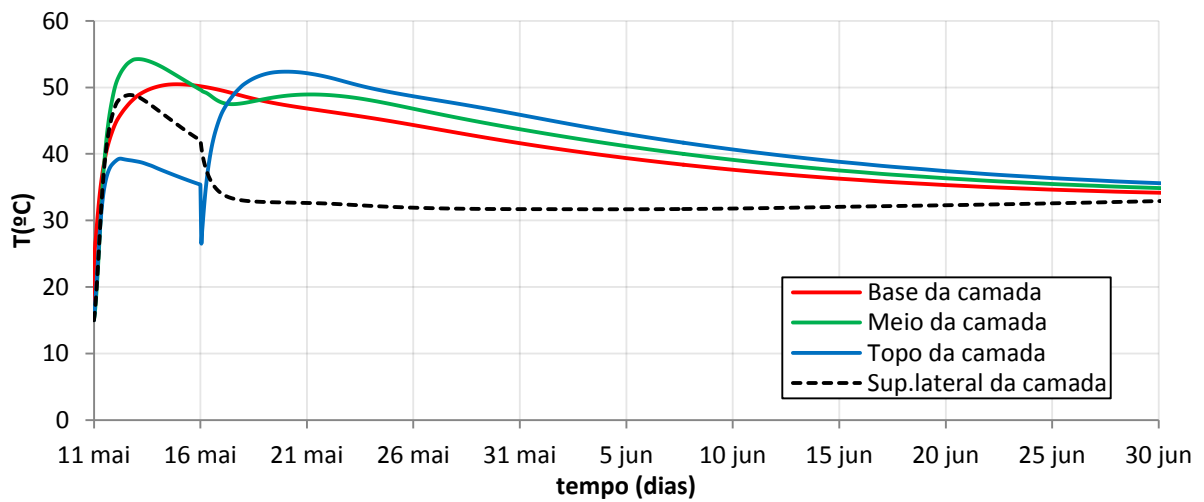


Fig.5.17 - Temperatura na 9ª camada de betão: Início de betonagem na Primavera

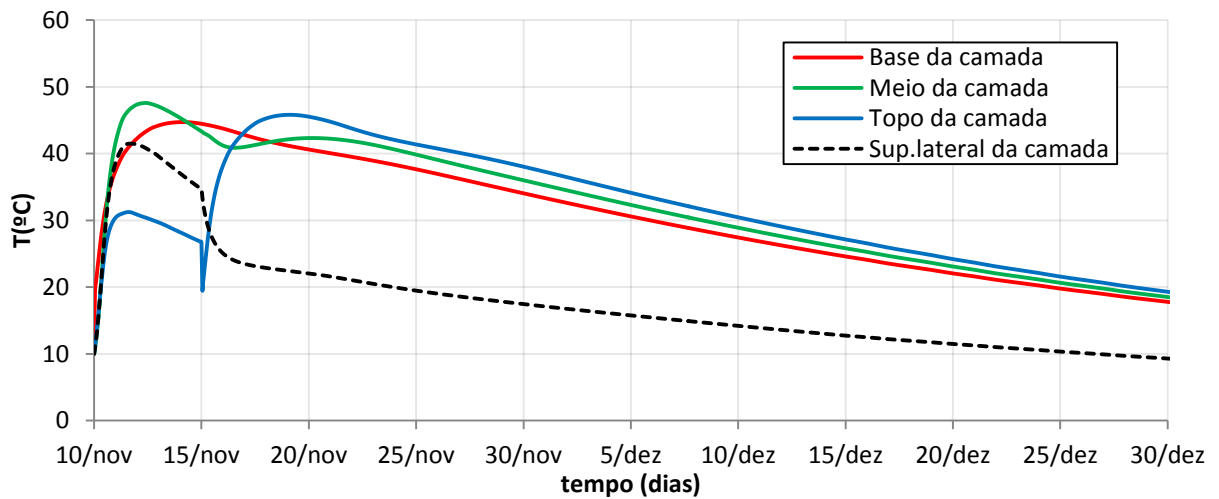


Fig.5.18 - Temperatura na 9ª camada de betão: Início de betonagem no Outono

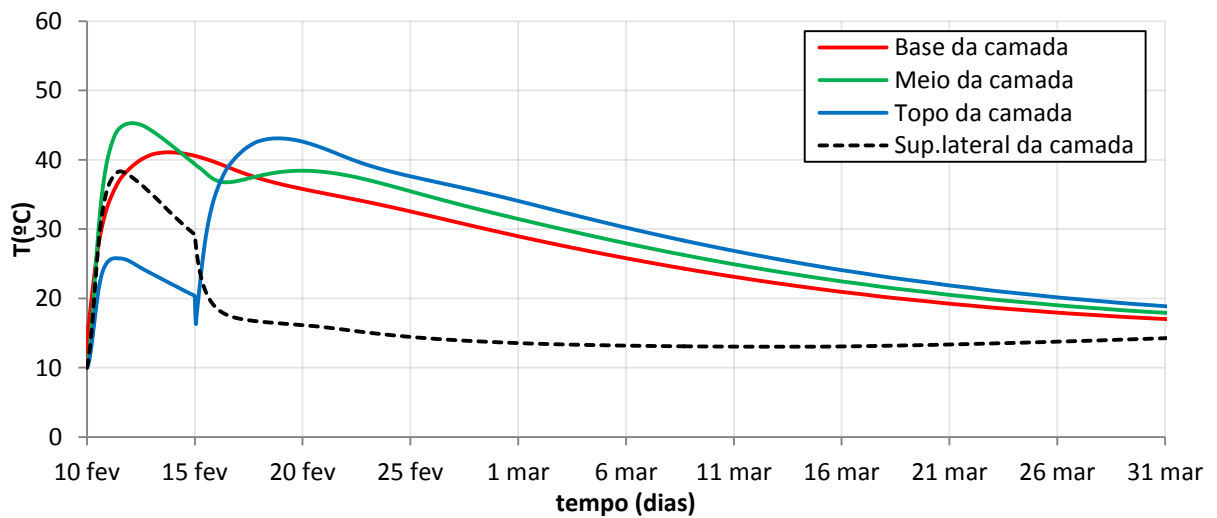


Fig.5.19 - Temperatura na 9ª camada de betão: Início de betonagem no Inverno

Em termos de temperaturas máximas atingidas pelo betão, não se verificam grandes problemas. Esta questão foi verificada para a Análise de referência (situação de Verão) em que se observou que as temperaturas máximas não atingem os 70°C (máximo de acordo com as referências expostas no capítulo 3). Logo, sendo estas novas condições de betonagem referentes a temperaturas ambientes mais baixas, automaticamente assegura-se essa condição, uma vez que o betão atinge sempre temperaturas inferiores.

No entanto, as diferenças entre temperaturas já devem ser analisadas caso a caso. Verifica-se sempre que a maior diferença de temperatura se encontra entre a temperatura no meio da camada e a temperatura na superfície lateral da camada.

No caso da betonagem na Primavera, a diferença máxima entre temperaturas é de 22.9°C. Para a betonagem no Outono e Inverno atinge-se diferenças entre temperaturas de 23.7 e 22.9°C, respetivamente. À partida, a betonagem em qualquer uma das estações do ano não respeitará as especificações do projeto, que usualmente limitam esta diferença de temperaturas a 20°C.

Para um estudo mais geral da variação de temperaturas ao longo do pilar de descarregador de cheias, aconselha-se a consulta dos anexos A2, A3 e A4, referentes a situações de Primavera, Outono e Inverno, respetivamente.

5.3.2.2. Análises mecânicas

- **Análise das tensões na direção x**

Relativamente às tensões σ_x verifica-se claramente a influência da betonagem em diferentes estações de ano. Através dos gráficos apresentados pelas Fig.5.20 a Fig.5.22, verifica-se que as tensões no topo da camada são superiores para a situação de Primavera.

As tensões nesta zona do betão são muito dependentes da temperatura ambiente. Como tal, seria de esperar que estas fossem superiores numa situação de Outono, já que a temperatura ambiente tende a baixar a partir de 10 de Novembro (início da betonagem da 9ª camada), favorecendo a existência de fortes gradientes térmicos entre esta e a temperatura do betão. No entanto, tal não se verifica porque o tempo de análise é relativamente curto, por isso acaba por ser determinante a temperatura ambiente nos instantes iniciais. Verifica-se assim que, as tensões de tração no topo da camada são maiores, quanto maior for a temperatura ambiente nos instantes iniciais.

Contudo, é necessário ter em consideração que a temperatura inicial do betão no Outono é de 10°C, enquanto que na Primavera o betão é colocado a 15°C. Este fator acaba por determinar maiores tensões σ_x no topo da camada, para o caso da betonagem na Primavera.

No entanto, é inevitável atingir elevadas tensões σ_x no topo da camada, seja qual for a altura do ano em que se comece a betonar o pilar. Mesmo no Inverno atinge-se tensões superiores a 4MPa nesta zona do betão. Logo, será inevitável o aparecimento de fendas verticais (direção y) no topo da camada.

Através das figuras já enunciadas é possível verificar que, quanto menores as tensões de tração no topo da camada, maiores as tensões de tração no meio da camada. Numa situação de betonagem no Inverno (Fig.5.22) as tensões de tração no meio da camada atingem os 2MPa. Apesar de tudo, a tensão σ_x é inferior à resistência à tração à idade respetiva.

Na base da camada não se verificam alterações significativas das tensões σ_x . Muito provavelmente, porque o betão nesta zona encontra-se mais longe da principal superfície convectiva (topo da camada). Logo, a influência da temperatura ambiente é muito menor.

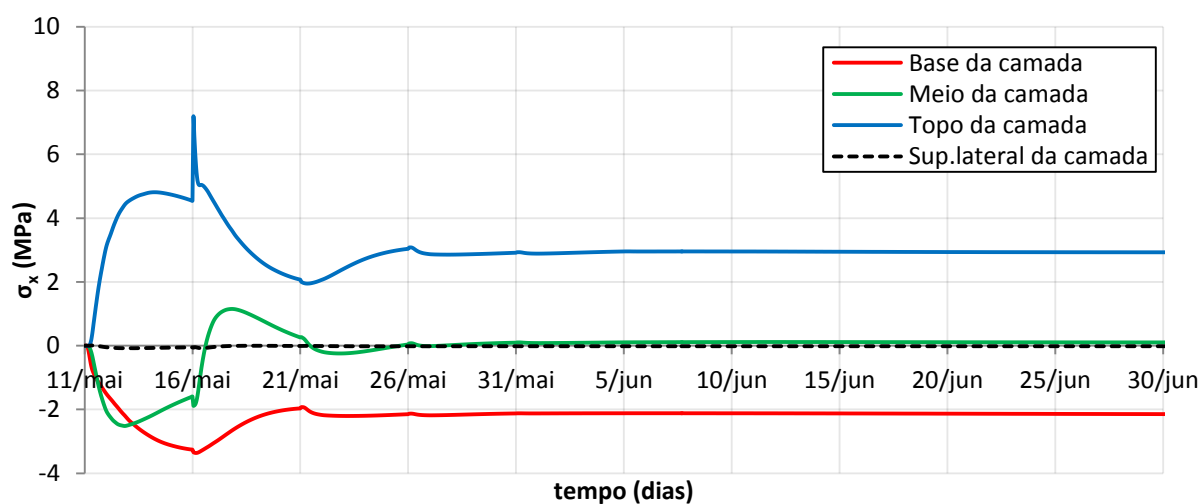


Fig.5.20 - Tensões σ_x na 9ª camada de betão: Primavera

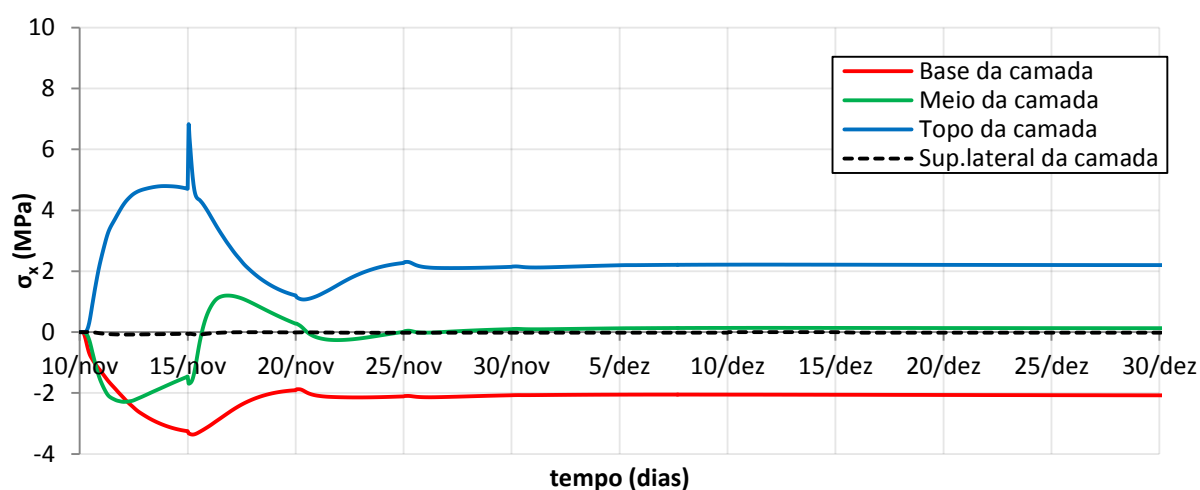


Fig.5.21 - Tensões σ_x na 9ª camada de betão: Outono

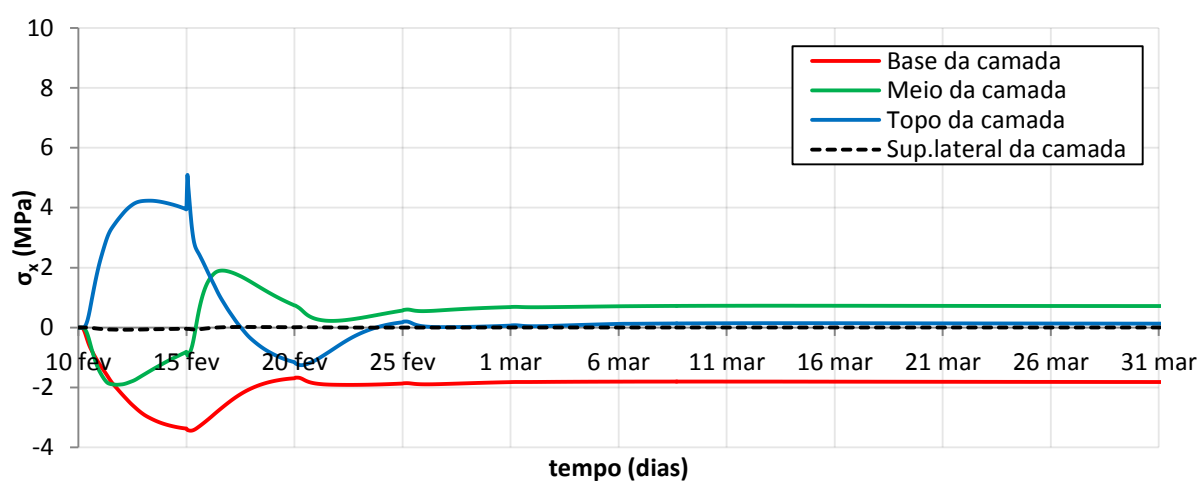


Fig.5.22 - Tensões σ_x na 9ª camada de betão: Inverno

• Análise das tensões na direção y

Nos primeiros 5 dias, as tensões σ_y na superfície lateral da camada (ver Fig.5.23 a Fig.5.25), estão essencialmente condicionadas pela temperatura ambiente. No entanto, verifica-se que durante essa data, as tensões nesta zona do betão são muito semelhantes, independentemente da data de início de betonagem. Esta situação acontece porque, durante os primeiros 5 dias, o betão está cofrado. Logo, as trocas de calor com o ambiente são consideravelmente mais baixas.

Posteriormente a essa data, verifica-se que as tensões tendem para valores de compressão, claramente devido às trações que começam a aparecer nas zonas mais interiores do betão (por causa da dissipação do calor gerado pela hidratação do cimento). De um modo geral, as tensões σ_y na superfície lateral da camada acabam por ser controladas pela cofragem, que impede a existência de grandes diferenças para estas tensões.

Relativamente às outras zonas do betão, verifica-se também que, a variação de tensões nesta direção é muito pequena nos primeiros dias. Contudo, com o decorrer do tempo as tensões de tração tendem a crescer, sendo que na Primavera, esta situação parece mais preocupante, uma vez que ultrapassa os 2MPa.

Observando os mapas de tensões σ_y do anexo A2, conclui-se que estas trações acabam por estabilizar entre valores de 2 e 2.5MPa, sendo estes muito próximos da resistência máxima à tração do betão.

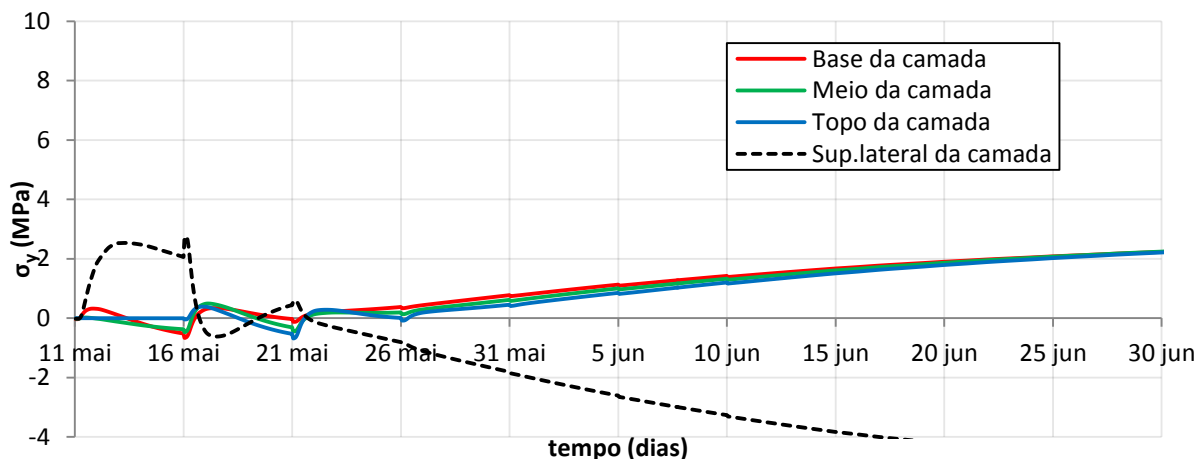


Fig.5.23 - Tensões σ_y na 9ª camada de betão: Primavera

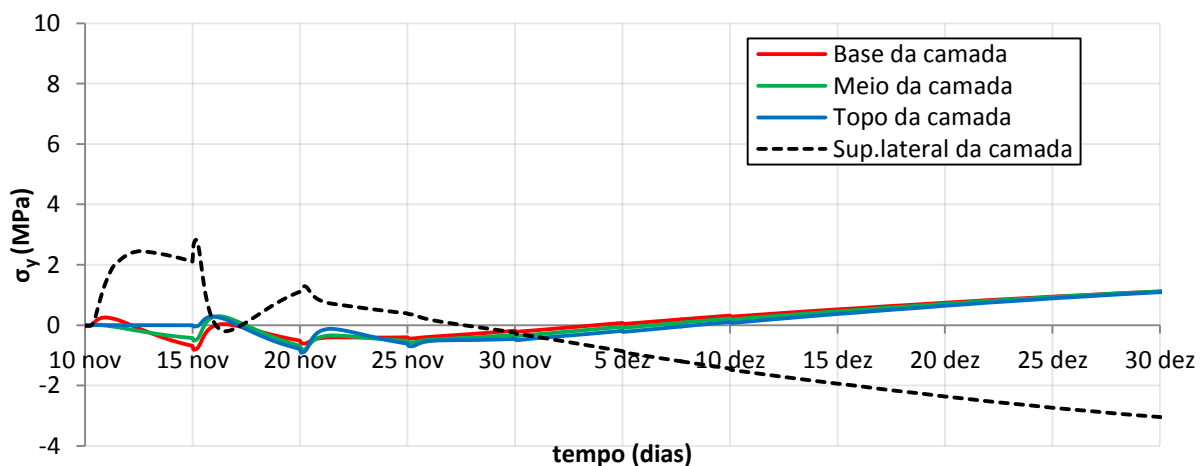
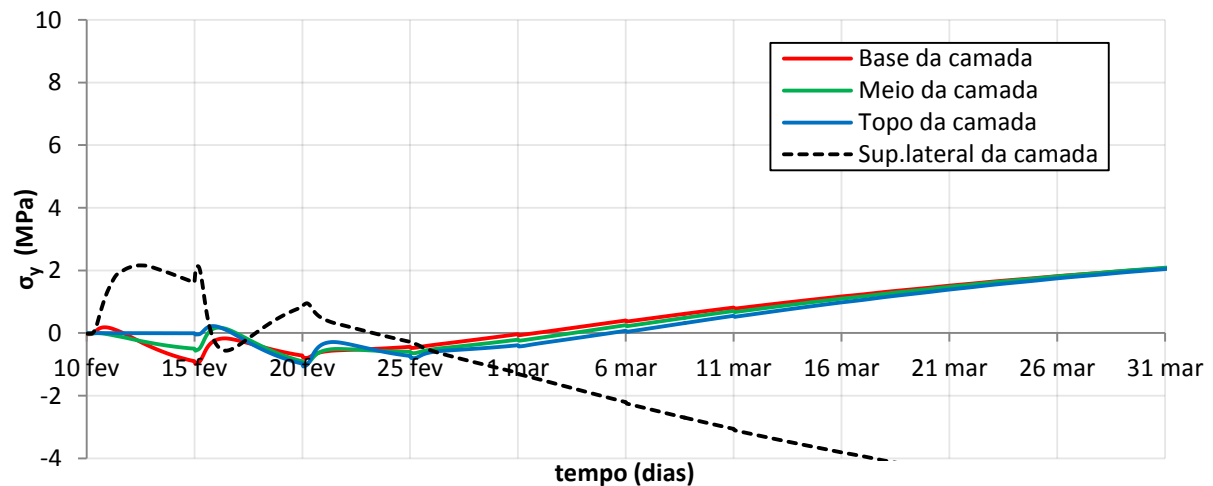


Fig.5.24 - Tensões σ_y na 9ª camada de betão: Outono

Fig.5.25 - Tensões σ_y na 9ª camada de betão: Inverno

- **Análise das tensões na direção z**

Os problemas associados às tensões σ_z não ocorrem logo no início da betonagem, independentemente da data de início de betonagem arbitrada.

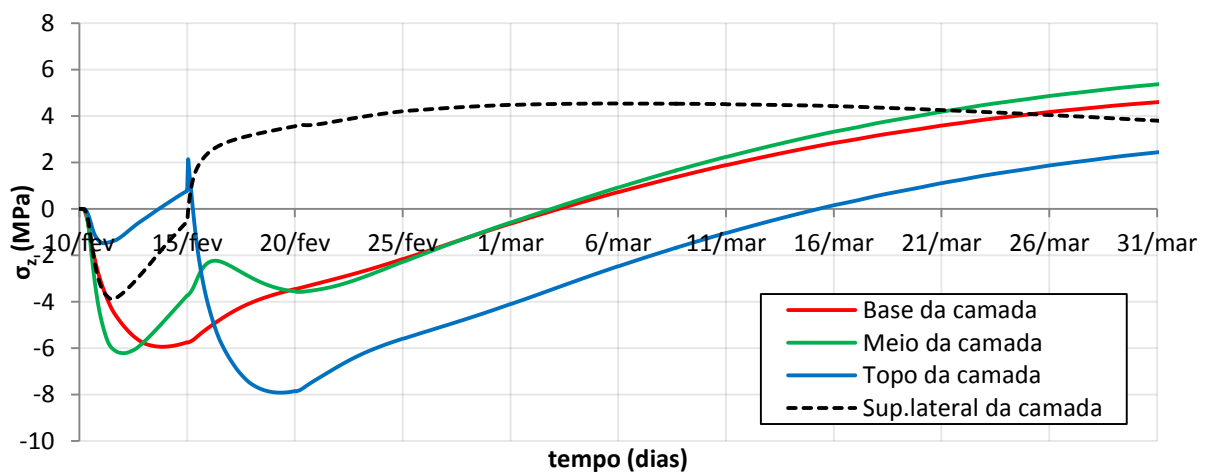
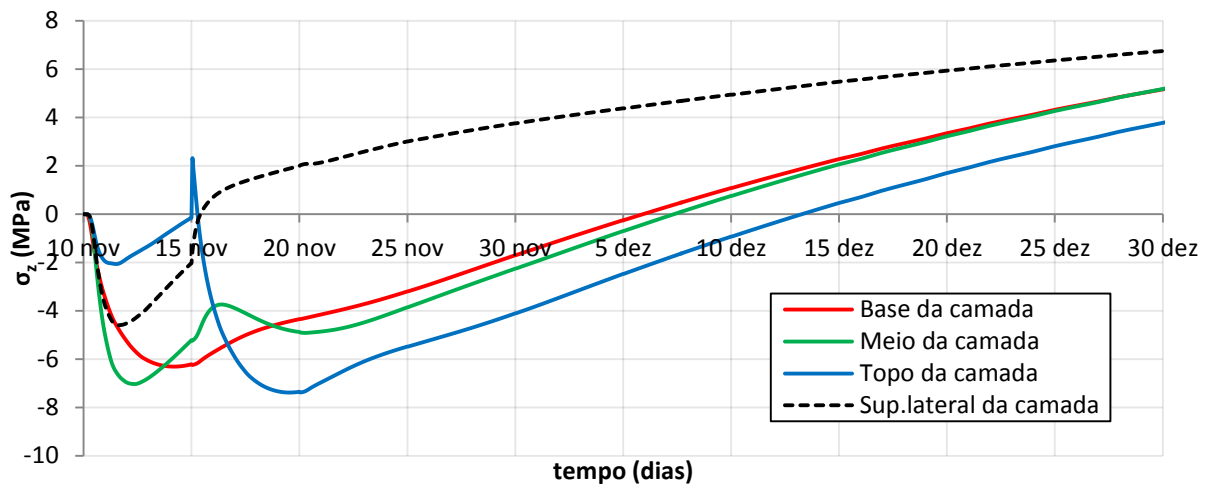
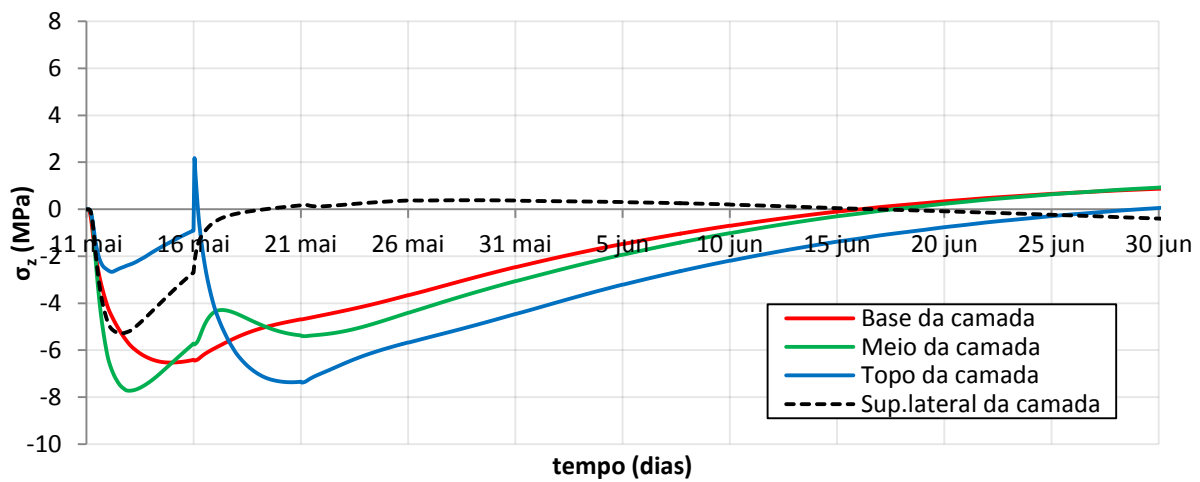
Contudo, verifica-se uma situação mais favorável na Primavera (Fig.5. 26) para a camada em análise. É relevante referir, que isto se verifica devido às elevadas temperaturas do ar que sucedem na Primavera. Logo, o facto de a temperatura do ar estar sempre a aumentar, reduz significativamente os gradientes térmicos existentes entre este e o betão. Esta situação é determinante para a obtenção de tensões de tração consideravelmente inferiores em todas as zonas do betão.

Comparando a situação de Outono (Fig.5.27) com a de Inverno (Fig.5.28), verifica-se que as tensões de tração do betão são atingidas mais cedo no Inverno. Uma vez que a temperatura ambiente é consideravelmente inferior nesta altura do ano, os fortes gradientes térmicos existentes provocam esta situação. No entanto, verifica-se que estas tensões de tração começam a estabilizar mais cedo no Inverno, enquanto que no Outono continuam a crescer. Esta situação deve-se ao facto de se sucederem temperaturas superiores após o Inverno, enquanto que, após o Outono, a temperatura ambiente baixa, favorecendo a existência de fortes gradientes térmicos.

Ao nível das tensões σ_z é claro que o comportamento da variação de tensões da nona camada é mais favorável na Primavera.

Contudo, analisando os anexos A1 a A4 verifica-se que nas camadas subjacentes a esta, as conclusões são diferentes. Na situação de Primavera verificam-se elevadas tensões de tração nas primeiras 5 camadas do pilar. Os resultados obtidos na primeira camada do pilar estão condicionados pela temperatura admitida para o betão do descarregador de cheias. No entanto, nas camadas acima desta não é razoável admitir esse proposto.

De um modo geral, as tensões nas primeiras 5 camadas estão condicionadas pela temperatura inicial do betão e pela temperatura ambiente do primeiro mês de betonagem. Como tal, a situação de betonagem no Verão (Análise de referência) é a que confere melhores resultados de tensões σ_z para estas primeiras camadas.



5.3.2.3. Risco de fendilhação

- **Risco de fendilhação: 9ª camada**

As análises de tensões apresentadas previamente são fundamentais para um melhor entendimento do risco de fendilhação agora apresentado.

Como seria de esperar, verifica-se que é inevitável o aparecimento de fendas no topo da camada, seja qual for a data para o início da betonagem. Os elevados valores de índice de fendilhação no topo da camada para os primeiros 5 dias, estão associados às elevadas tensões σ_x apresentadas anteriormente. O aparecimento de fendas verticais com desenvolvimento longitudinal no topo da camada é quase certo.

Na superfície lateral da camada verifica-se praticamente a mesma situação. O aparecimento de fendas horizontais, nos primeiros 5 dias, devido a tensões σ_y é muito provável, independentemente da estação do ano. Simultaneamente, nesta zona do betão há uma elevada probabilidade de aparecimento de fendas verticais devido às tensões σ_z . Numa situação de betonagem no Outono ou Inverno, o índice de fendilhação nesta zona do betão ultrapassa claramente a unidade ($F_{tu} = 1$), ou seja, a tensão principal máxima é superior à resistência à tração média do betão. Numa situação de Primavera, tal já não acontece, porque as tensões σ_z são consideravelmente mais baixas na camada em análise, tal como já tinha sido referido.

Relativamente ao meio, base e superfície lateral da camada de betão em análise, os resultados obtidos indicam que a melhor altura do ano para betonar (esta camada) é na Primavera. Nestas zonas do betão o risco de aparecimento de qualquer tipo de fendas é mais baixo. No Outono e no Inverno há maior probabilidade, mais uma vez devido às elevadas tensões de tração para fora do plano, σ_z .

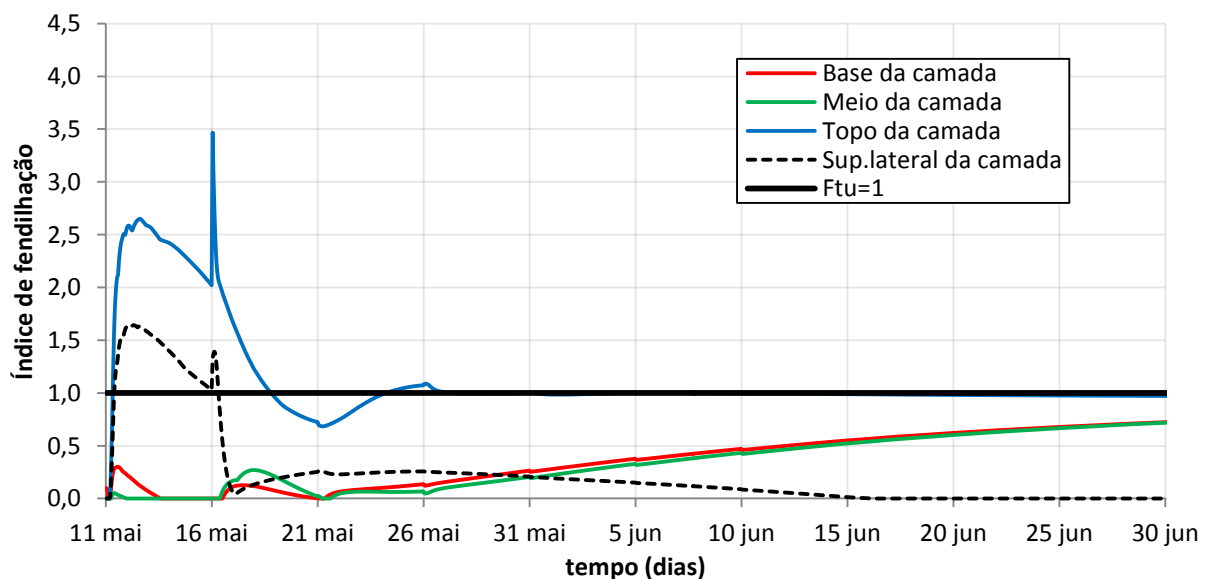


Fig.5.29 - Índice de fendilhação na 9ª camada: Primavera

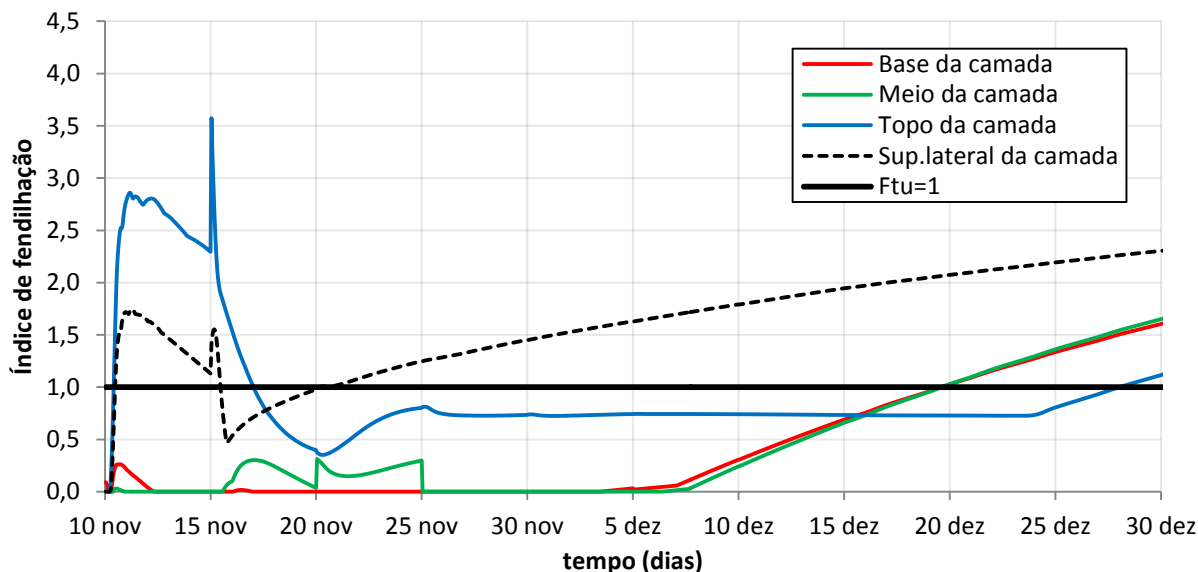


Fig.5.30 – Índice de fendilhação na 9ª camada: Outono

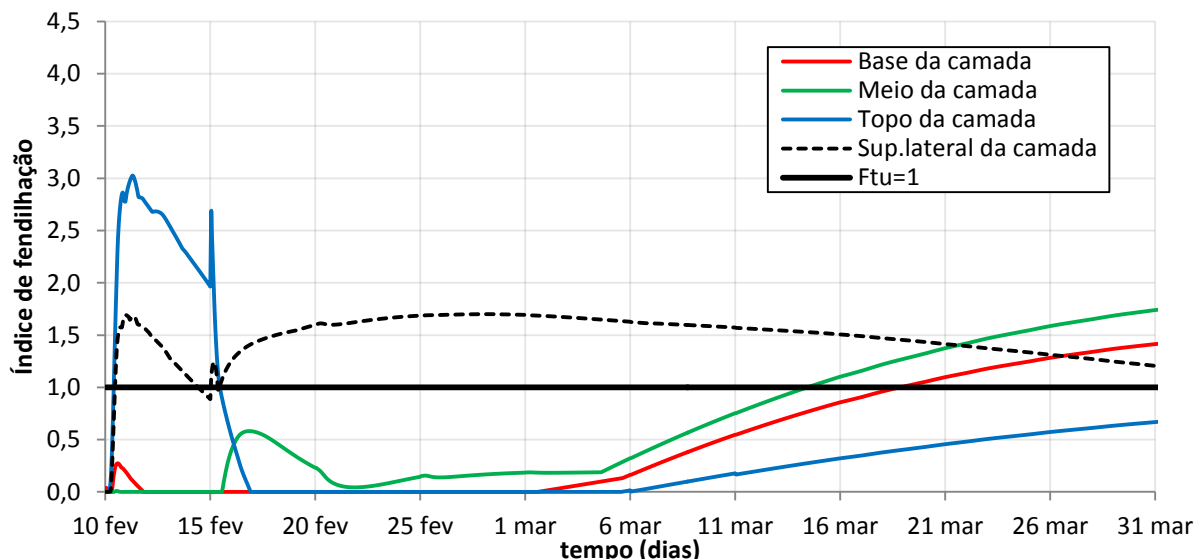


Fig.5.31 - Índice de fendilhação na 9ª camada: Inverno

- **Risco de fendilhação: avaliação geral através de mapas**

No entanto, tendo em conta os resultados obtidos nos mapas de índice de fendilhação (anexos A1 a A4) é possível observar, de uma forma mais geral, as várias camadas do betão. Verifica-se que independentemente da data de início de betonagem, vai haver sempre aparecimento de fendas.

Recorrendo aos gráficos apresentados anteriormente (Fig.5.29 a Fig.5.31) verifica-se que o risco de fendilhação da 9ª camada é inferior na Primavera, tal como já tinha sido referido. Contudo, analisando os mapas de índice de fendilhação dos anexos, verifica-se que, de um modo geral, a betonagem no Verão (análise de referência) acaba por ser a menos desfavorável de todas em termos de risco de fendilhação global.

5.3.3. UTILIZAÇÃO DE DIFERENTES PARÂMETROS PARA A LEI DA DUPLA POTÊNCIA

Devido à inexistência de resultados experimentais para a determinação dos parâmetros da lei da dupla potência, é relevante comparar resultados obtidos com diferentes conjuntos de parâmetros.

São agora apresentados resultados relativos à análise da nona camada, em que é possível determinar a influência da utilização dos parâmetros do Conjunto A e B, e ainda desprezando o fenómeno da fluência. A partir da Fig.5.7 verifica-se que os parâmetros do Conjunto B consideram maiores deformações de fluência. Logo, é expectável observarem-se resultados relativamente diferentes.

De forma a individualizar a análise e a entender o risco de fendilhação em vários pontos do betão, decidiu-se estudar individualmente as quatro zonas em análise da nona camada. Estes estudos foram elaborados tendo por base a análise de referência (situação de Verão).

5.3.3.1. Análises termo-mecânicas

A consideração de maiores deformações por fluência tem consequências bastante relevantes no estado de tensão do betão. Essas consequências podem ser positivas ou negativas, como tal é essencial perceber as diferenças dos gráficos apresentados abaixo.

- **Análise termo-mecânica: tensões σ_x**

Relativamente às tensões σ_x obtidas, verifica-se que a consideração de maiores deformações por fluência (parâmetros do Conjunto B) permite, de um certo modo, aliviar a pré-compressão inicial do betão.

O betão sofre maiores deformações devido à fluência, como tal a compressão inicial neste é consideravelmente menor. Este fenómeno acaba por ser prejudicial, porque o betão tende a tracionar com o decorrer do tempo, devido à dissipação do calor gerado pela hidratação do cimento. Logo, se inicialmente estiver menos comprimido, as trações no betão acabam por ser atingidas mais cedo. No entanto, é necessário referir que se o betão tender a tracionar logo nos primeiros instantes, as tensões de tração também se podem atenuar com maiores deformações por fluência (ver Fig.5.34).

Ao nível da base da camada (Fig.5.32) este fenómeno não é relevante, porque o betão acaba por nunca atingir tensões de tração. No entanto, ao nível do meio da camada (Fig.5.33) esta situação já se destaca um pouco mais, sendo que a curva do Conjunto B atinge tensões de tração um pouco superiores, mas mesmo assim sem qualquer risco de fendilhação.

No topo da camada verifica-se uma situação contrária (Fig.5.34). O betão atinge tensões de tração consideravelmente mais baixas se for considerado os parâmetros do Conjunto B (maiores deformações por fluência). Para este conjunto de parâmetros verifica-se que o meio e a base da camada de betão encontram-se menos comprimidos, por isso estas trações no topo são consideravelmente inferiores. Não se geram diferenças de tensões ao longo da camada de forma tão acentuada, como as que ocorrem com os parâmetros do Conjunto A.

Para a superfície lateral da camada não se encontram representadas as tensões σ_x , porque nesta zona o betão não se encontra restringido, independentemente da consideração, ou não, do fenómeno de fluência. Logo, as tensões são praticamente nulas, tal como já tido sido referido na análise de referência.

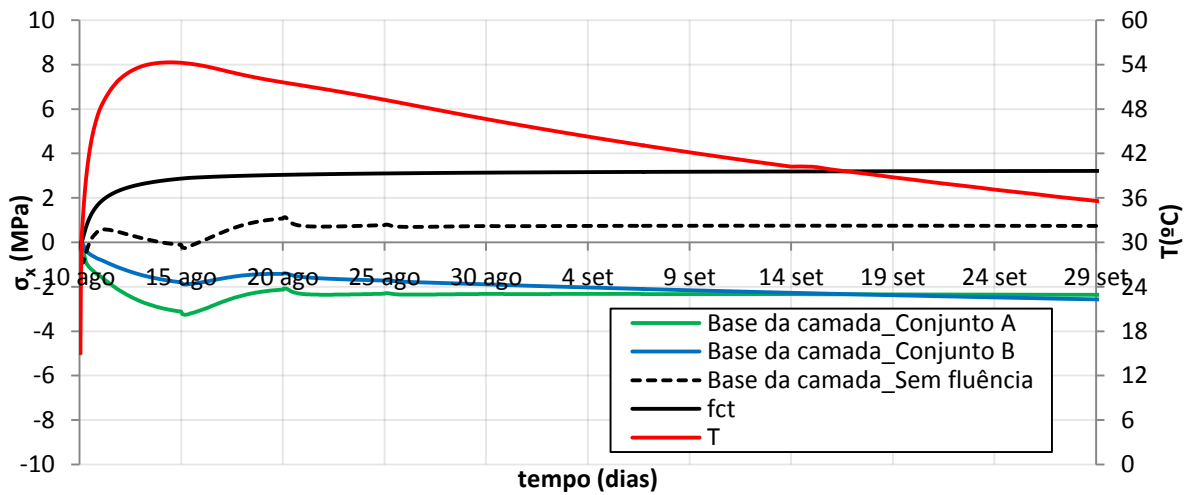


Fig.5.32 – Tensões σ_x para diferentes parâmetros da lei da dupla potência: base da camada

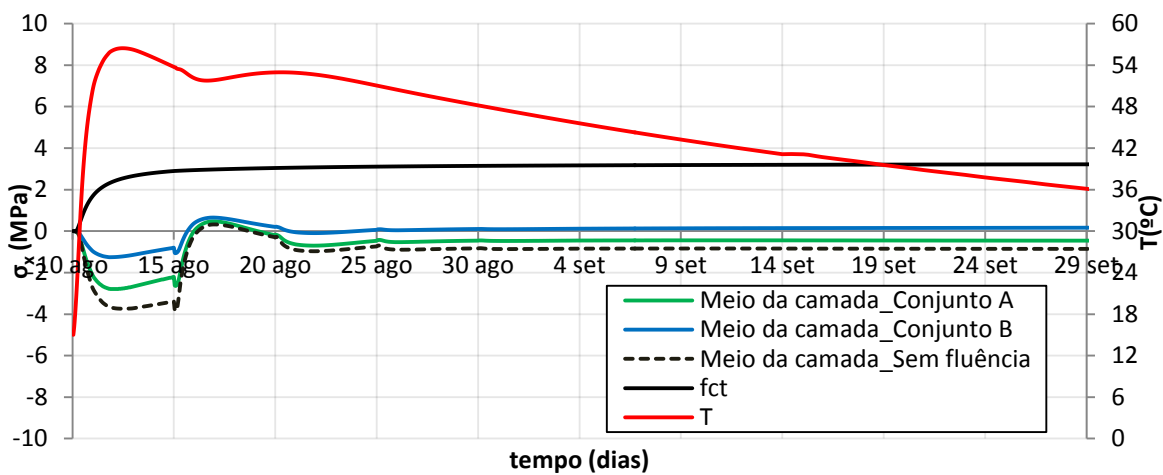


Fig.5.33 – Tensões σ_x para diferentes parâmetros da lei da dupla potência: meio da camada

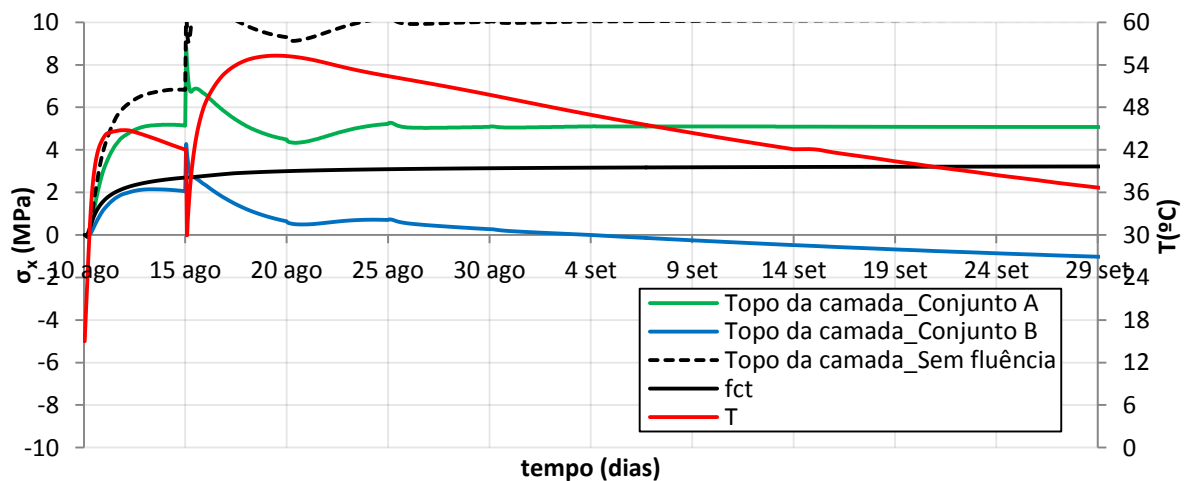


Fig.5.34 – Tensões σ_x para diferentes parâmetros da lei da dupla potência: topo da camada

• **Análise termo-mecânica: tensões σ_y**

Para as tensões σ_y , a consideração de uma lei de fluência com os parâmetros do Conjunto B, permite observar tensões de tração nesta direção, inferiores às registadas com os parâmetros do Conjunto A.

Apesar da existência do peso próprio, o decréscimo mais lento da temperatura no interior do pilar provoca uma deformação no betão esperada, que consiste na compressão das superfícies laterais e na tração do interior da camada. A superfície lateral perde calor mais rapidamente nos instantes iniciais (primeiros 5 dias), sendo que posteriormente tende a comprimir, porque já se encontra no processo de arrefecimento.

A consideração de maiores deformações por fluência permite que as tensões de tração existentes acabam por atingir valores inferiores (ver Fig.5.35 a Fig.5.38).

Já tinha sido mencionado na análise de referência, que os fortes gradientes térmicos entre a temperatura do betão e a temperatura ambiente provocam elevadas tensões de tração σ_y nas superfícies laterais, durante os primeiros 5 dias. Contudo, a consideração de maiores deformações por fluência reduz significativamente estas trações (Fig.5.38). É notável que, a partir da curva associada aos parâmetros do Conjunto B, o aparecimento de fendas horizontais (direção x) nas faces laterais deixa de ser preocupante, porque as tensões de tração não ultrapassam a resistência à tração do betão.

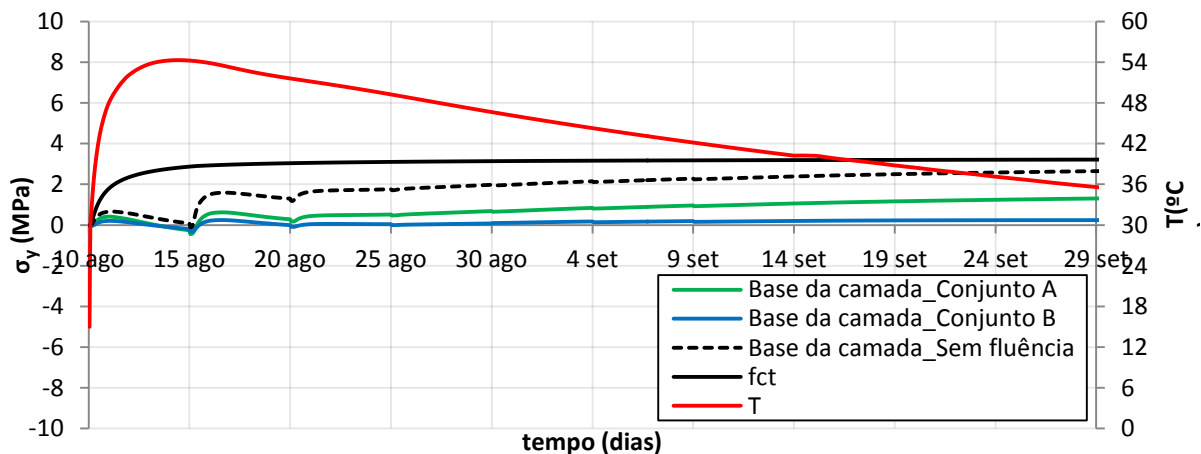


Fig.5.35 - Tensões σ_y para diferentes parâmetros da lei da dupla potência: base da camada

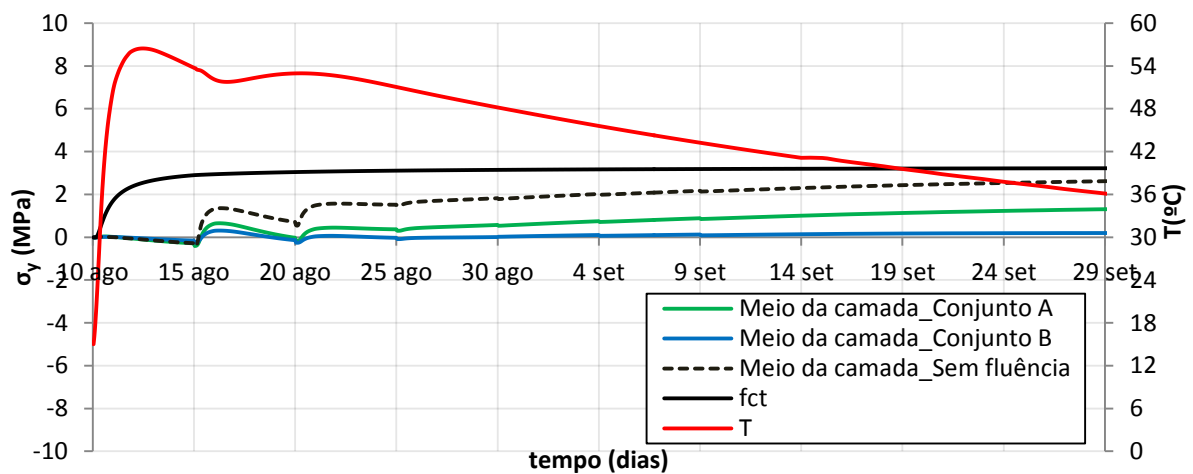
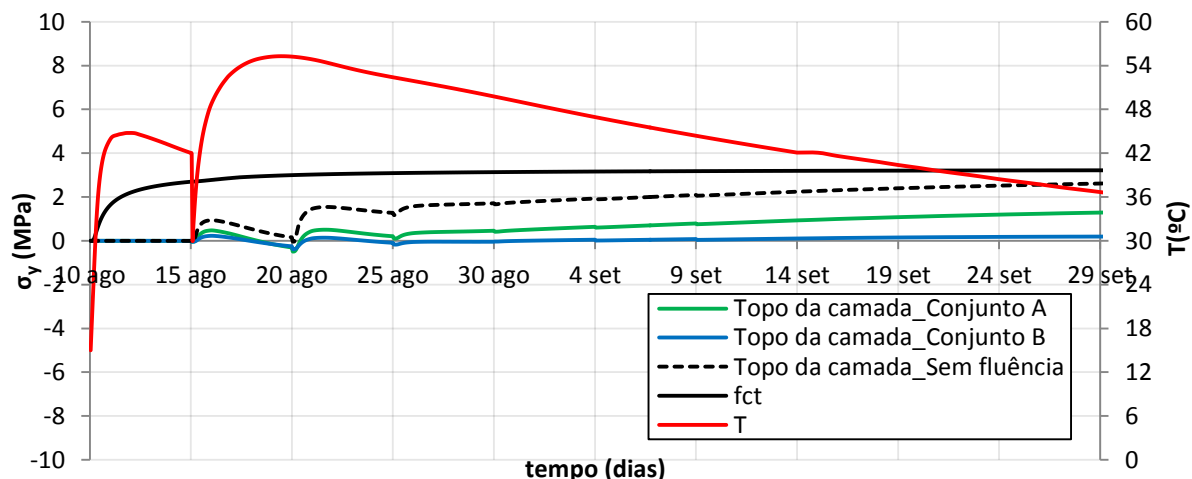
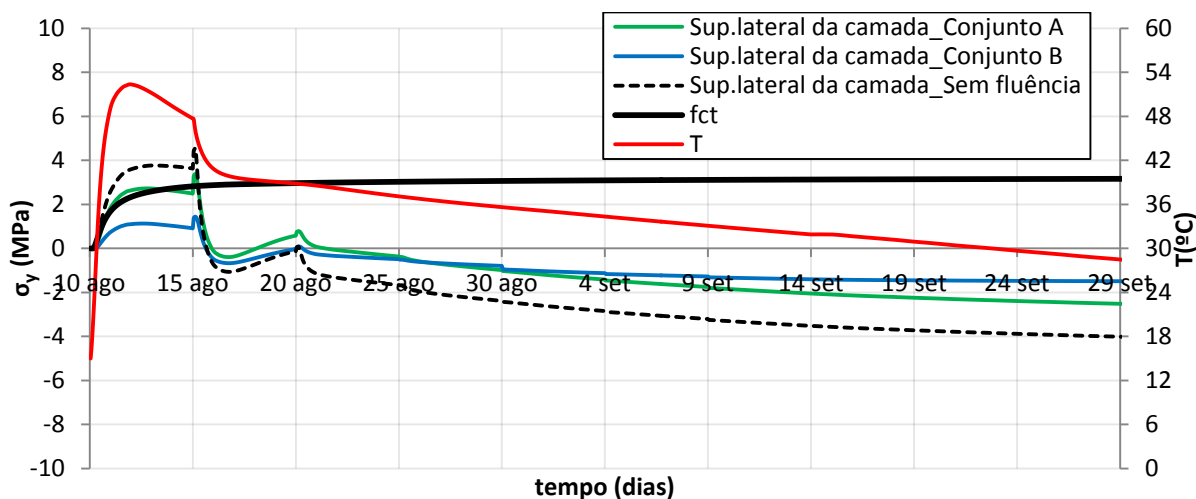


Fig.5.36 - Tensões σ_y para diferentes parâmetros da lei da dupla potência: meio da camada

Fig.5.37 - Tensões σ_y para diferentes parâmetros da lei da dupla potência: topo da camadaFig.5.38 - Tensões σ_y para diferentes parâmetros da lei da dupla potência: superfície lateral da camada

- Análise termo-mecânica: tensões σ_z**

O alívio da pré-compressão inicial do betão, devido à consideração de maiores deformações por fluência, produz resultados mais significativos no estudo das tensões σ_z .

Verifica-se claramente que, seja qual for a zona em análise do betão, a influência da consideração dos parâmetros do Conjunto B, aos quais estão associadas maiores deformações por fluência, permitem verificar a existência de tensões de compressão substancialmente inferiores nas primeiras idades.

Para este tipo de tensões, este fenómeno é mais preocupante, porque as tensões de tração acabam por ultrapassar a resistência à tração do betão consideravelmente mais cedo. No caso da superfície lateral da camada (Fig.5.42) este fenómeno não será muito importante, devido à existência de armaduras junto às faces.

Contudo, no caso da base, meio e topo da camada (Fig.5.39 a Fig.5.41) este fenómeno poderá ser mais importante. Mesmo sabendo que vai ser colocado pré-esforço nesta direção do pilar, a data da sua aplicação está mais condicionada. Como tal, é necessário atender à necessidade de colocar o pré-

esforço o mais cedo possível, de modo a evitar o aparecimento de fendas verticais (na direção y) no núcleo do betão.

É necessário atender ao facto de que se realizou um modelo 2D em estado plano de deformação, em que estão restringidas as deformações para fora do plano (direção z). Esta é uma condicionante do modelo, mas é um pressuposto razoável, porque o pilar de descarregador de cheias tem cerca de 40m de comprimento. No entanto, esta situação poderá ser uma das causas das grandes diferenças obtidas para estas tensões, com a utilização de parâmetros do Conjunto A e Conjunto B.

Como o betão se encontra completamente restringido nesta direção, a efeito da fluência condiciona mais severamente o estado de tensão na direção z.

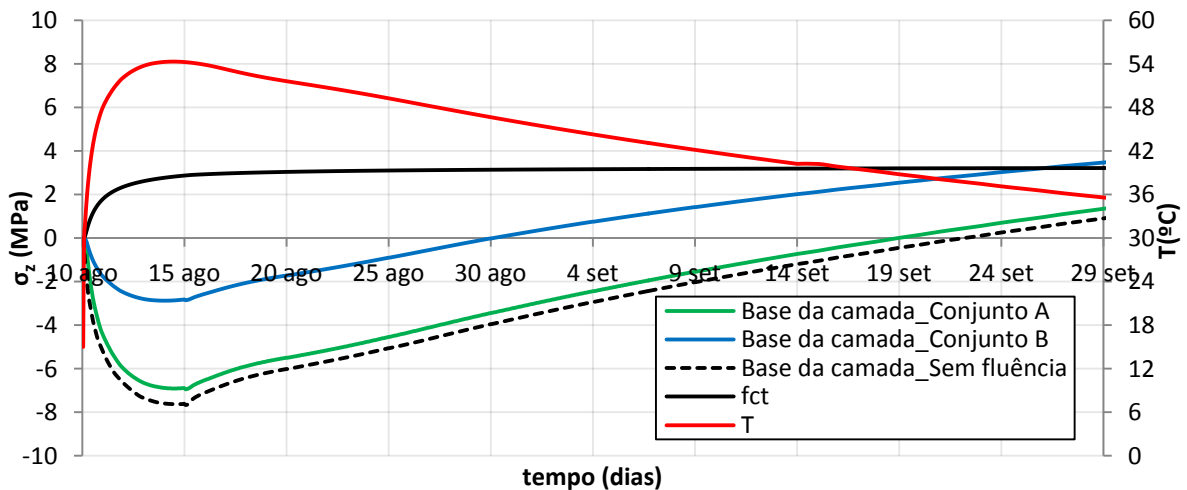


Fig.5.39 – Tensões σ_z para diferentes parâmetros da lei da dupla potência: base da camada

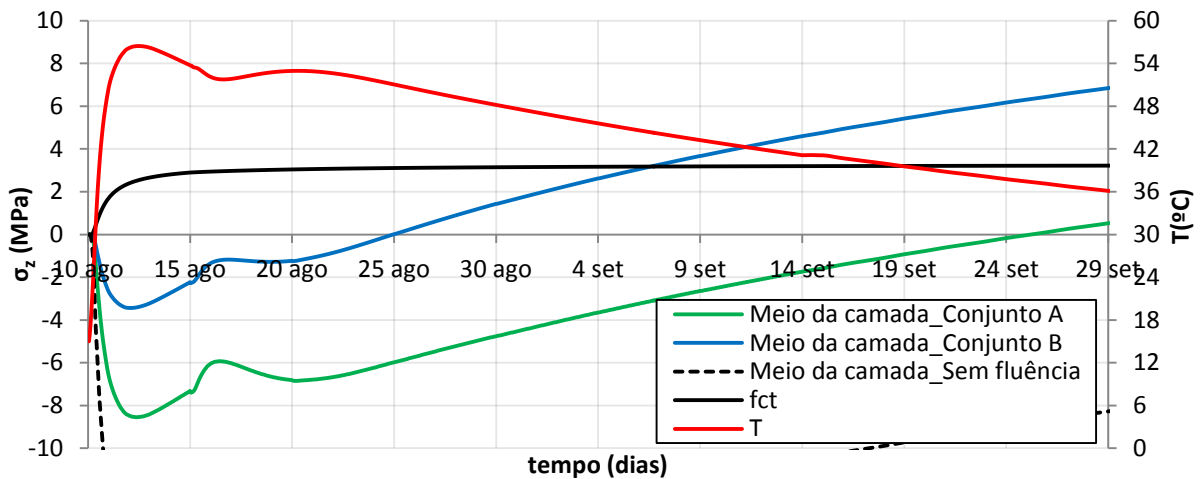


Fig.5.40 - Tensões σ_z para diferentes parâmetros da lei da dupla potência: meio da camada

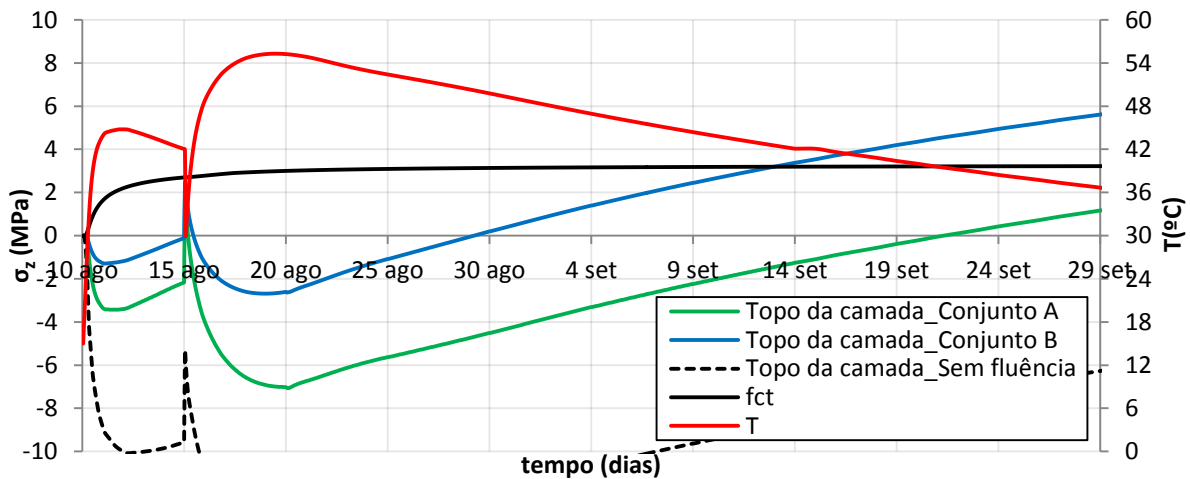


Fig.5.41 - Tensões σ_z para diferentes parâmetros da lei da dupla potência: topo da camada

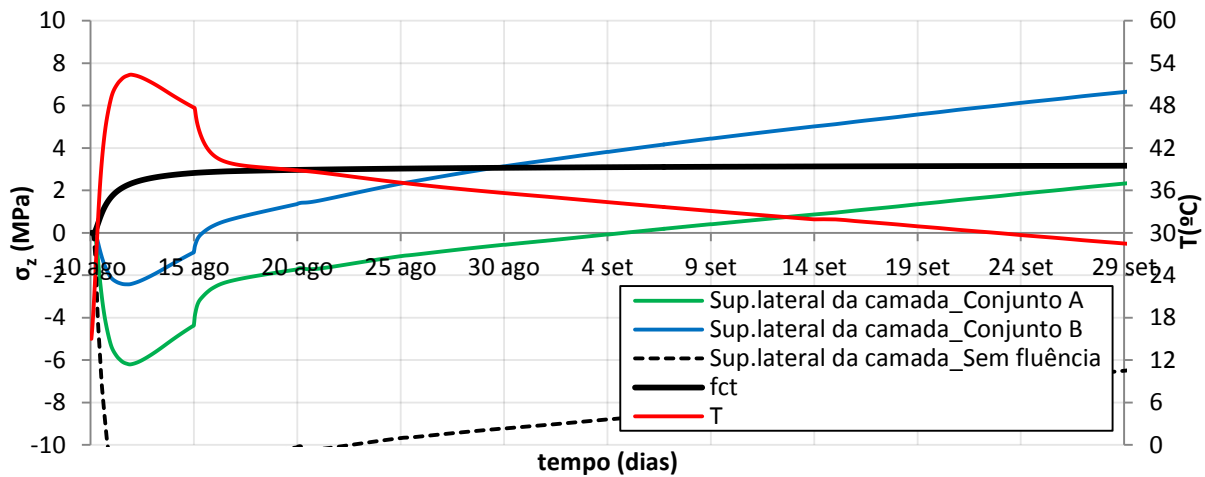


Fig.5.42 - Tensões σ_z para diferentes parâmetros da lei da dupla potência: superfície lateral da camada

5.3.4. VARIAÇÃO DO COEFICIENTE DE DILATAÇÃO TÉRMICA

Os resultados experimentais disponíveis na literatura permitem concluir que o coeficiente de dilatação térmica varia consideravelmente durante as primeiras horas da hidratação.

Com o intuito de entender o impacto da variação do coeficiente de dilatação térmica no campo de tensões do betão, foi considerada a curva presente na Fig.5.43. Esta curva tem por base os resultados experimentais obtidos na referência (Laplante, P. and Boulay, C., 1994).

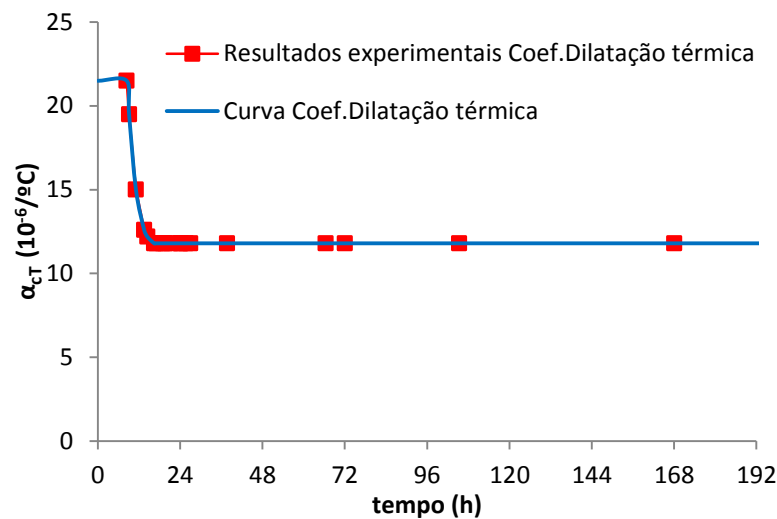


Fig.5.43 - Variação do coeficiente de dilatação térmica

Os valores recolhidos para o coeficiente de dilatação térmica foram obtidos com uma temperatura constante do betão de 20°C. O *software* DIANA não permite a consideração do coeficiente de dilatação térmica em função da maturidade. Como tal, considerou-se a variação desta propriedade em função do tempo, tal como representado na Fig.5.43.

Obviamente que a fiabilidade dos resultados obtidos pode ser posta em causa, devido a este pressuposto que se está a assumir. Contudo, convém referir que o coeficiente de dilatação térmica depende também de outros fatores, tais como a as condições térmicas, humidade, microestrutura, rede porosa, tipo de agregados, cimento, entre outros (Azenha, M.Â.D., 2004).

Devido à extrema dificuldade em considerar uma lei de variação para esta propriedade, às diversas contradições existentes sobre os fatores que influenciam o coeficiente de dilatação térmica, e ainda ao facto de que não existirem estudos que comprovem uma grande dependência deste coeficiente em função da maturidade, admitiu-se que é razoável assumir este pressuposto.

5.3.4.1. Análises termo-mecânicas

As análises elaboradas para a influência da variação do coeficiente de dilatação térmica no campo de tensões do betão, foram executadas tendo por base a Análise de referência (situação de Verão).

É necessário referir que, à partida, não eram expectáveis resultados tão distintos para as tensões no betão como os que se vieram a obter. Esta situação deve-se ao facto de se ter admitido uma evolução muito rápida do módulo de elasticidade nos primeiros dias.

A Fig.5.4 apresentada no início deste capítulo eventualmente sobrestima um pouco o módulo de elasticidade nas primeiras horas. Para uma idade equivalente de 0.5 dias obtém-se um módulo de elasticidade de 18.6GPa. Esta situação é sem dúvida determinante, uma vez que se está a admitir que o betão tem uma rigidez assinalável em idades muito jovens. Logo, se o betão está mais rígido é espectável um agravamento das tensões (compressões ou trações conforme o caso), uma vez que as variações significativas do coeficiente de dilatação térmica ocorrem nas primeiras 24 horas.

- **Análise termo-mecânica: tensões σ_x**

Os resultados apresentados pelas figuras referentes às tensões σ_x (Fig.5.44 a Fig.5.46) permitem concluir que a consideração da variação do coeficiente de dilatação térmica produz resultados ligeiramente diferentes.

De um modo geral, estes resultados não acrescentarem mais conclusões ao nível do risco de fendilhação. A consideração da variação desta propriedade mecânica condiciona as deformações no betão, logo altera o estado de tensão. A partir dos resultados obtidos verifica-se a ocorrência de maiores compressões na base da camada (Fig.5.44) e maiores trações no topo da camada (Fig.5.45). Esta observação não constitui um grave problema, uma vez que já se tinha concluído que o betão no topo da camada fendilha de qualquer das maneiras.

No meio da camada (Fig.5.46) verifica-se uma maior compressão inicial, contudo também se verifica um maior valor para as trações entre os 6 e os 8 dias (16 e 18 de Agosto).

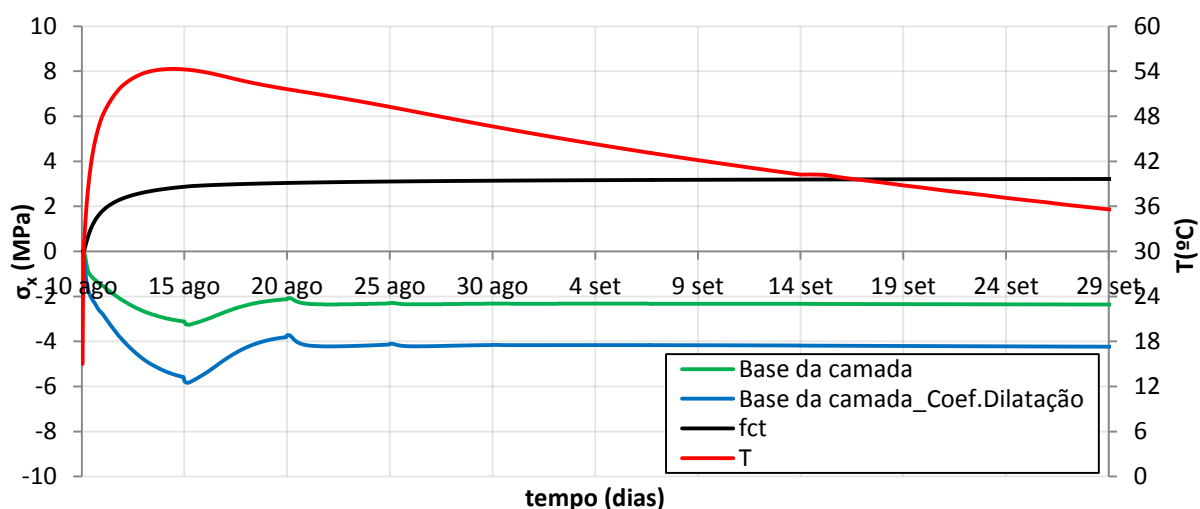


Fig.5.44 – Tensões σ_x considerando variação do coeficiente de dilatação térmica: base da camada

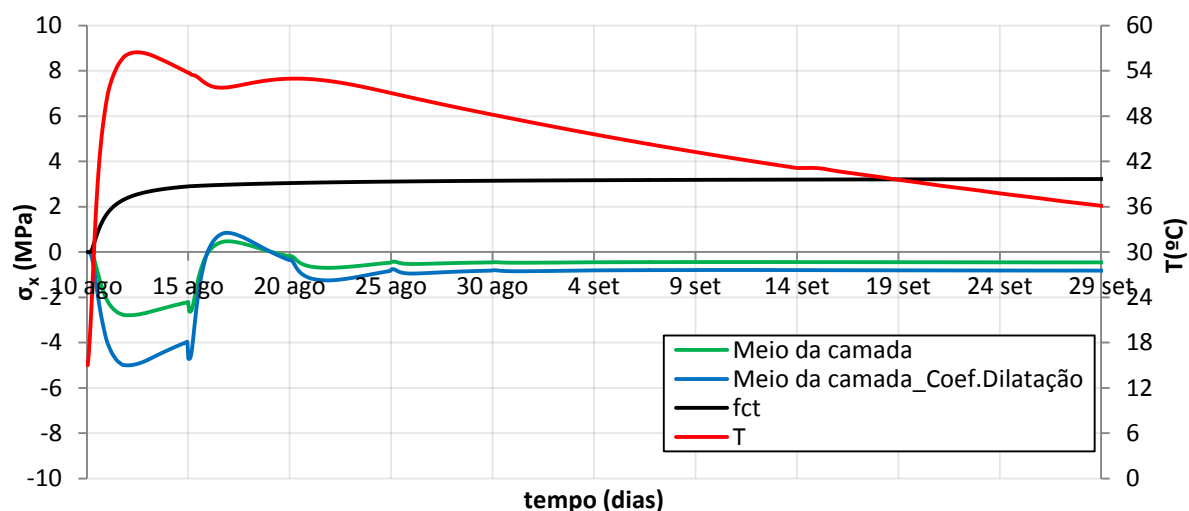


Fig.5.45 – Tensões σ_x considerando variação do coeficiente de dilatação térmica: meio da camada

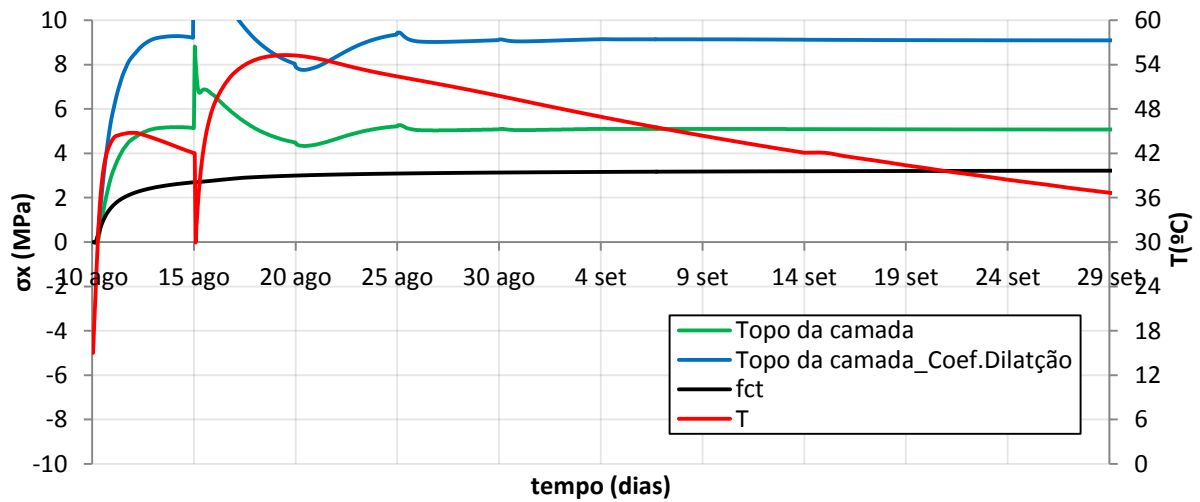


Fig.5.46 – Tensões σ_x considerando variação do coeficiente de dilatação térmica: topo da camada

- **Análise termo-mecânica: tensões σ_y**

Relativamente às tensões σ_y verifica-se de um modo geral, que a variação do coeficiente de dilatação térmica implica um aumento das trações no betão, seja qual for a zona em análise (ver Fig.5.47 a Fig.5.50). A aproximação destas tensões à curva de resistência máxima à tração é um pouco preocupante. No entanto, é necessário ter em consideração o que foi referido inicialmente, sobre a eventual sobrestimação do módulo de elasticidade nas primeiras idades.

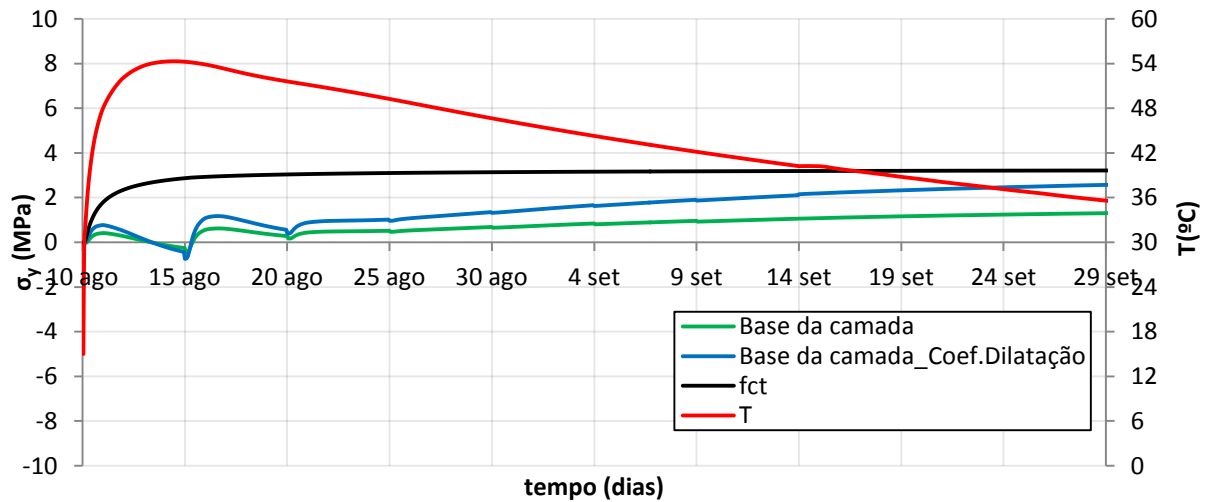


Fig.5.47 - Tensões σ_y considerando variação do coeficiente de dilatação térmica: base da camada

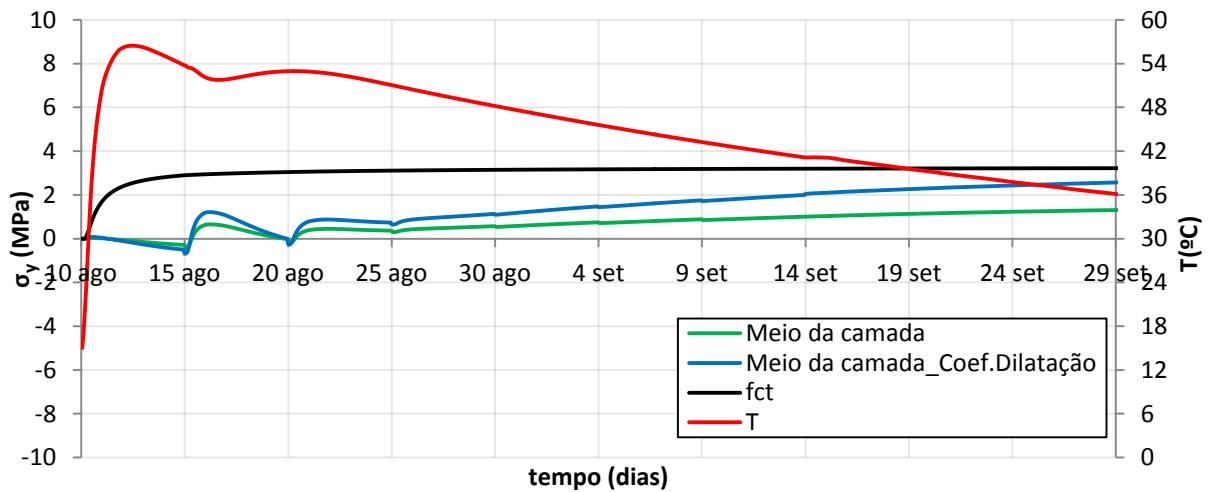


Fig.5.48 - Tensões σ_y considerando variação do coeficiente de dilatação térmica: meio da camada

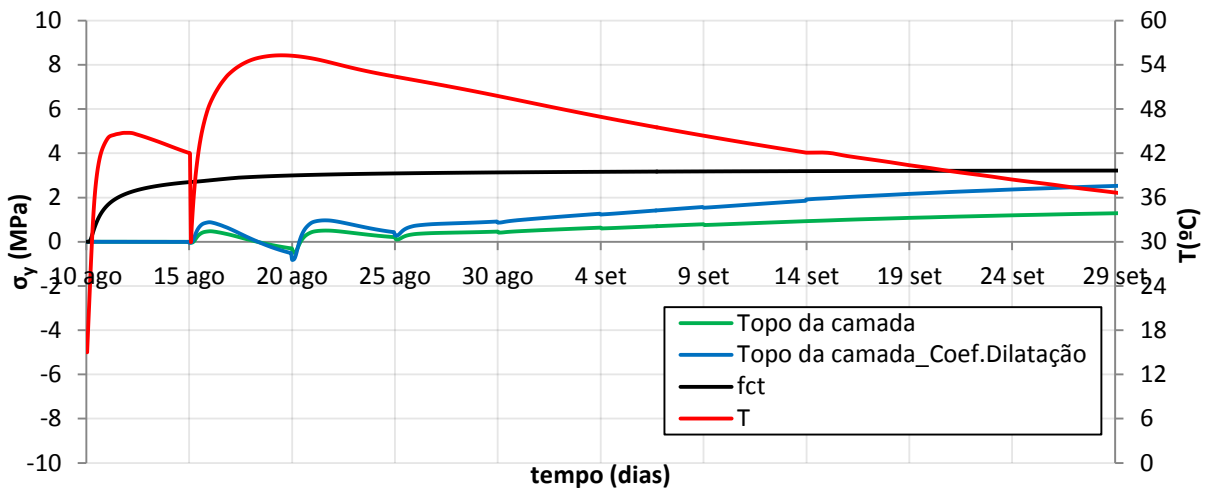


Fig.5.49 - Tensões σ_y considerando variação do coeficiente de dilatação térmica: topo da camada

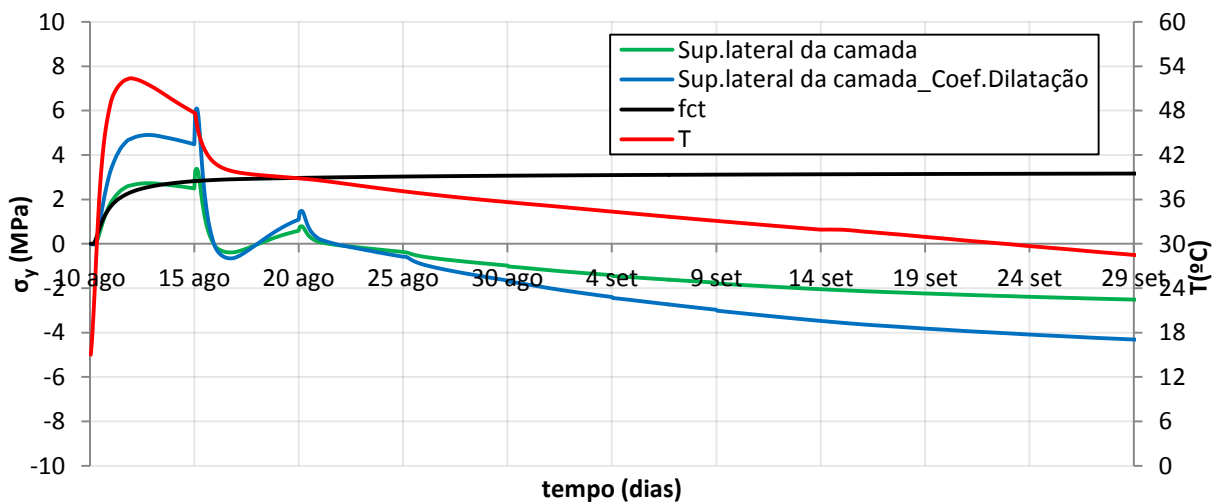


Fig.5.50 - Tensões σ_y considerando variação do coeficiente de dilatação térmica: superfície lateral da camada

• **Análise termo-mecânica: tensões σ_z**

A influência da variação do coeficiente de dilatação térmica condiciona severamente as tensões σ_z obtidas. Nesta direção o modelo utilizado pressupõe que o pilar de descarregador de cheias encontre-se completamente restringido, ou seja, assume que as extensões são nulas na direção z. Logo, estes resultados apresentados são ainda mais influenciados pelo facto de se ter considerado uma evolução do módulo elasticidade muito rápida nos primeiros dias.

Os gráficos apresentados (Fig.5.51 a Fig.5.54) para esta análise permitem verificar que a influência do coeficiente de dilatação térmica pode determinar valores de compressão no betão superiores nas primeiras idades. No entanto, o betão vai descomprimindo chegando mesmo a atingir a resistência máxima à tração do betão.

Convém salientar mais uma vez que estes resultados estão condicionados pela evolução do módulo de elasticidade, sendo esse efeito ainda mais significativo nas tensões para fora do plano.

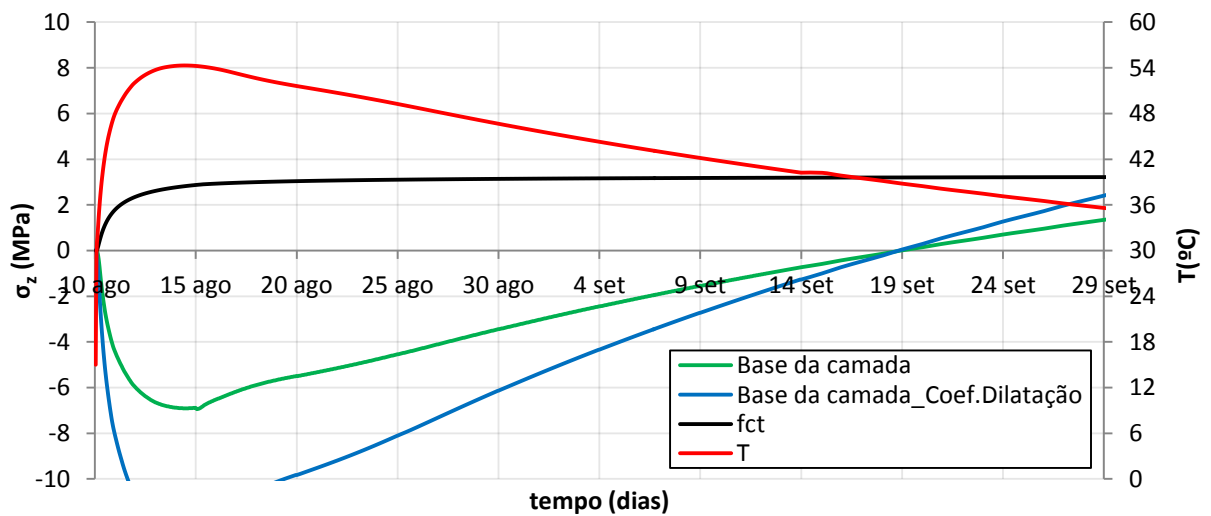


Fig.5.51 – Tensões σ_z considerando variação do coeficiente de dilatação térmica: base da camada

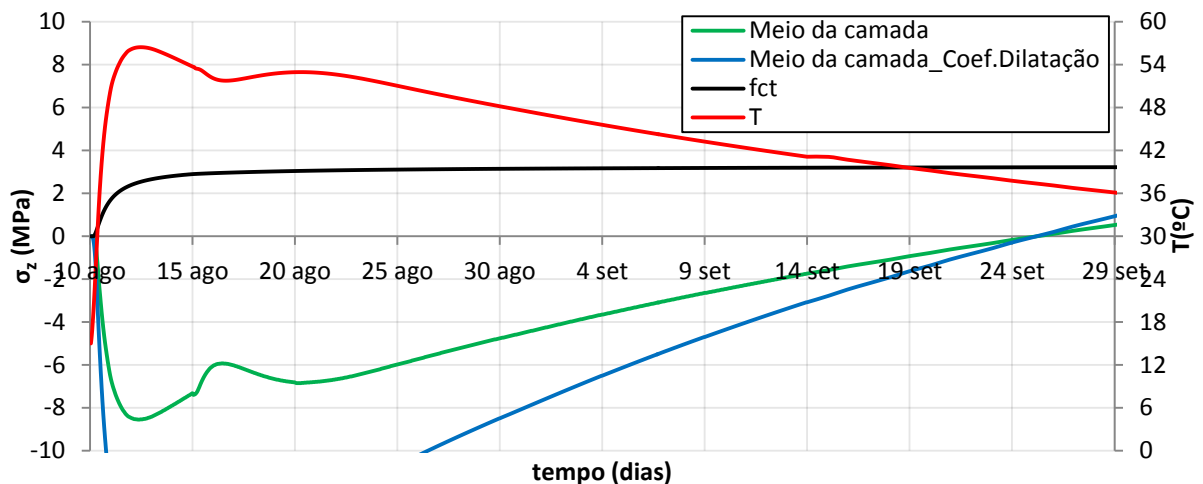
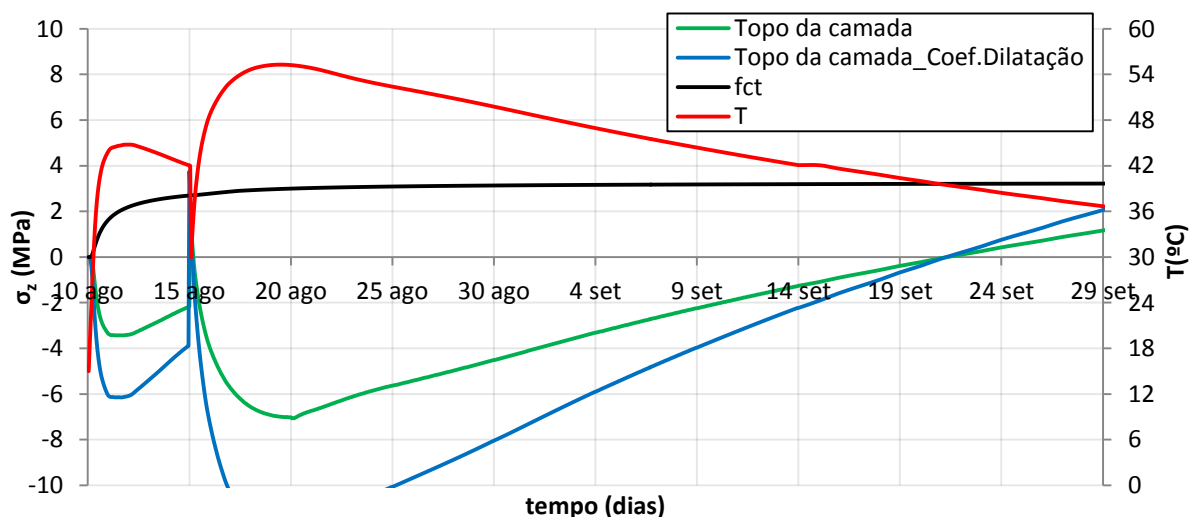
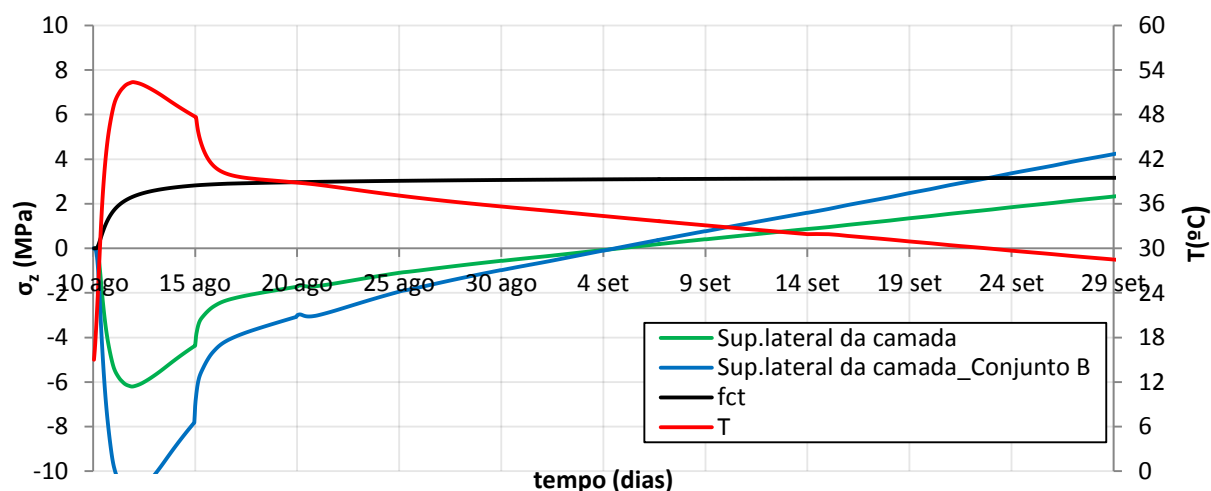


Fig.5.52 - Tensões σ_z considerando variação do coeficiente de dilatação térmica: meio da camada

Fig.5.53 - Tensões σ_z considerando variação do coeficiente de dilatação térmica: topo da camadaFig.5.54 - Tensões σ_z considerando variação do coeficiente de dilatação térmica: superfície lateral da camada

5.3.5. EVOLUÇÃO INICIAL DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DO BETÃO

A evolução do módulo de elasticidade nos primeiros dias é decisiva para a determinação do campo de tensões no betão. A consideração de uma rigidez superior nas primeiras horas poderá condicionar todo o comportamento das tensões, agravando claramente o estado de tensão nas primeiras idades (compressão ou tração).

No âmbito deste trabalho, o módulo de elasticidade foi definido de acordo o método da idade equivalente, tal como já havia sido referido. No entanto, resultados experimentais para a caracterização do crescimento do módulo de elasticidade, tal como os que se encontram representados na bibliografia (Azenha, M. [et al.], 2014), determinam a existência de um trecho curvo inicial no crescimento desta propriedade, em forma de S, difícil de representar numericamente.

Na Fig.5.55 está apresentado a azul a evolução do módulo de elasticidade ao longo do 1º dia (curva adotada para todas as análises que já foram apresentadas). Ainda nesta figura está apresentada a vermelho uma tentativa de otimização do crescimento do módulo de elasticidade nas primeiras horas.

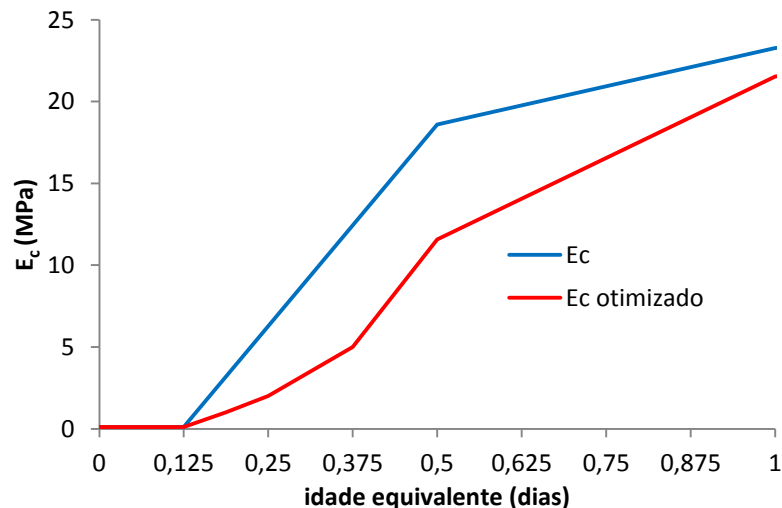


Fig.5.55 - Otimização da evolução do módulo de elasticidade

A partir desta otimização assegura-se uma maior semelhança com o crescimento em forma de S anteriormente referido, como também se garante um módulo de elasticidade mais baixo nas primeiras horas, uma vez que este estava claramente sobrestimado durante esta data.

Recorrendo a esta otimização, foram realizadas as análises agora apresentadas, nas quais é possível determinar as consequências, que o crescimento inicial do módulo de elasticidade induz no campo de tensões do betão.

5.3.5.1. Análises termo-mecânicas

As análises apresentadas para este estudo tiveram por base a Análise de referência, que vai servir como suporte de comparação com os resultados agora obtidos.

A partir dos gráficos apresentados abaixo verifica-se uma clara influência da evolução inicial do módulo de elasticidade, no campo de tensões σ_x .

- **Análise termo-mecânica: tensões σ_x**

A alteração do crescimento do módulo de elasticidade não dita grandes modificações no estado de tensão da base e meio da camada, ao nível das tensões na direção x (Fig.5.56 e Fig.5.57 respetivamente).

No topo da camada (Fig.5.58) o betão atinge tensões de tração mais baixas em cerca de 1MPa. No entanto, não é um resultado significativo o suficiente para colocar em causa o aparecimento de fendas associadas a estas tensões de tração. Estas revelam-se inevitáveis, em todos os estudos paramétricos que foram realizados ao longo deste capítulo.

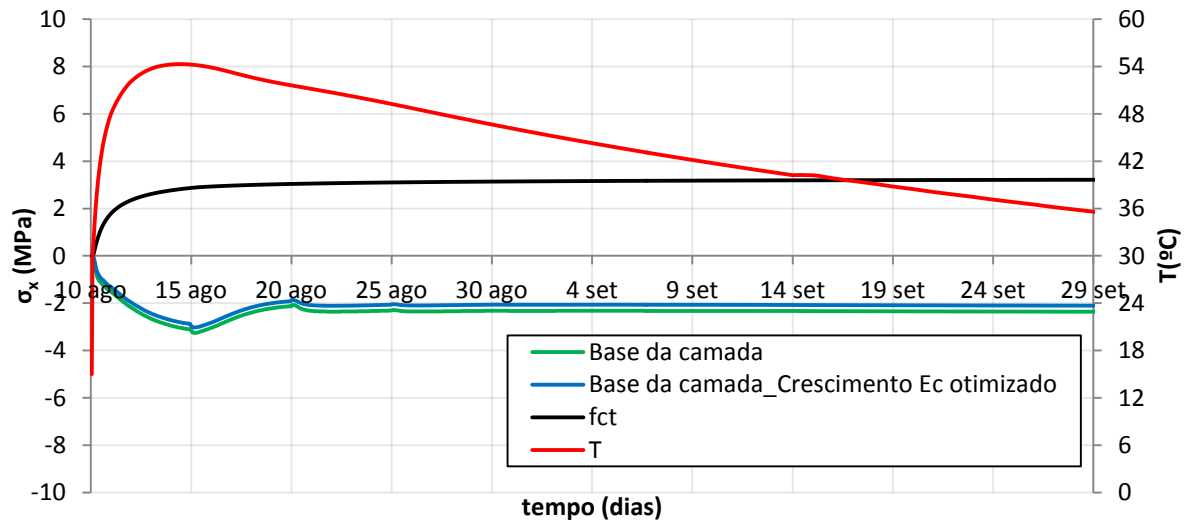


Fig.5.56 – Tensões σ_x considerando crescimento otimizado do módulo de elasticidade: base da camada

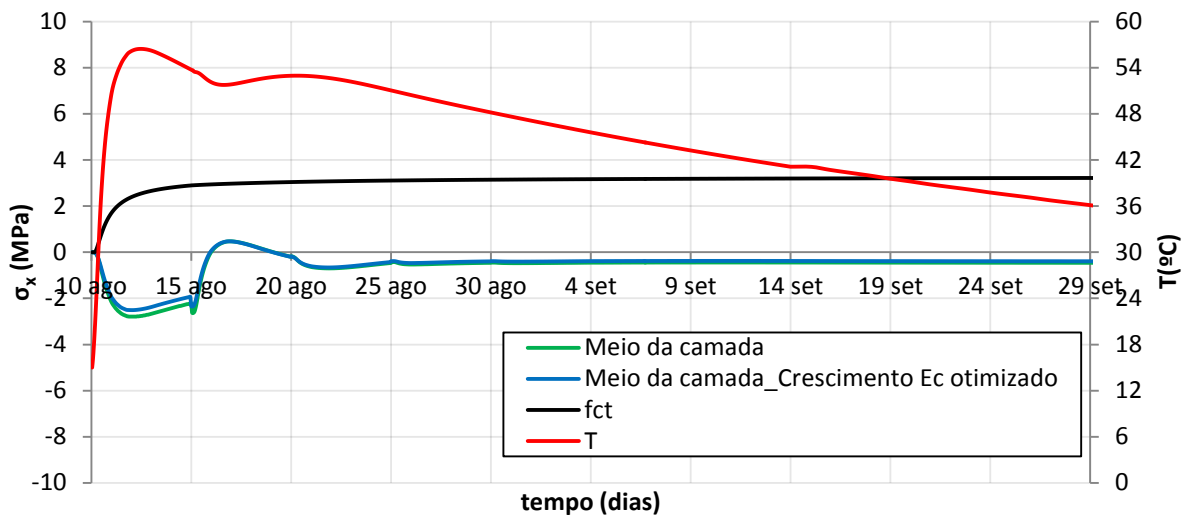


Fig.5.57 – Tensões σ_x considerando crescimento otimizado do módulo de elasticidade: meio da camada

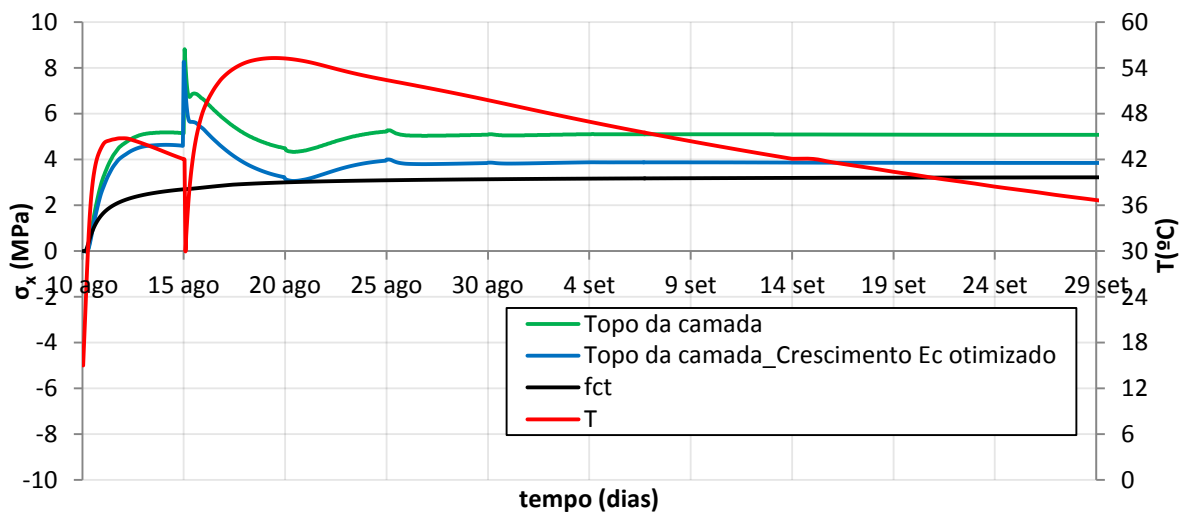
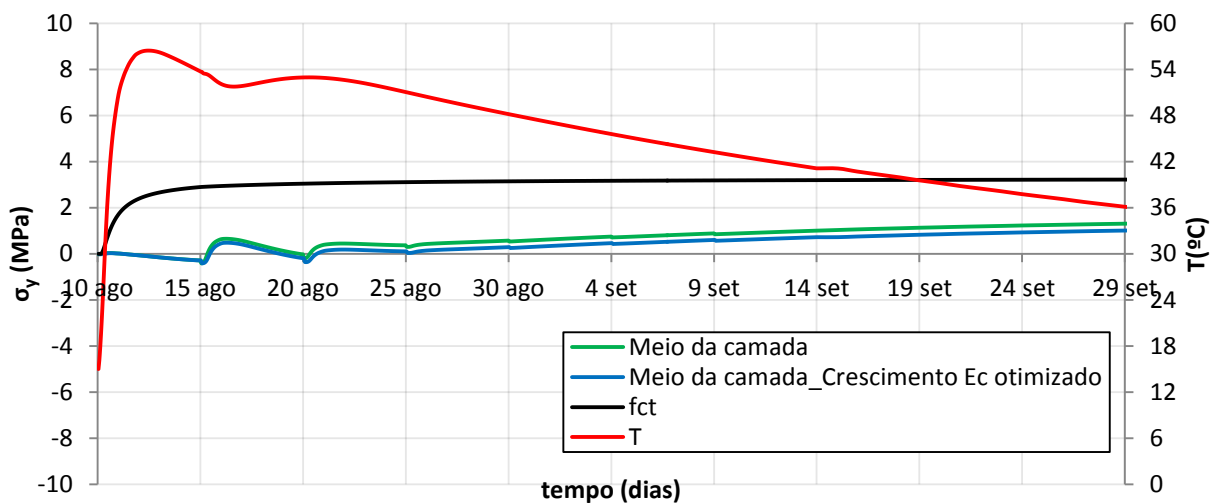
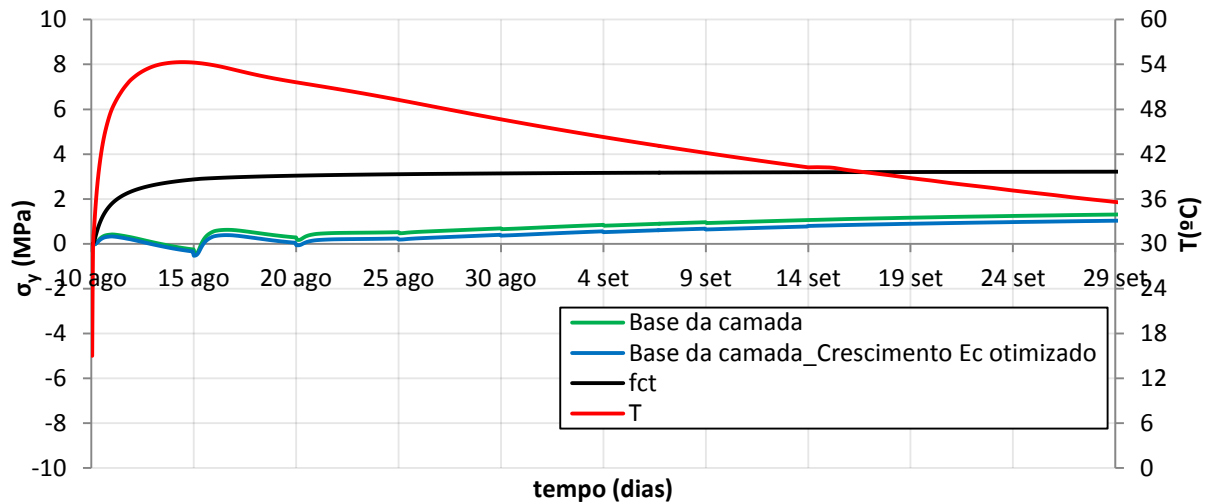


Fig.5.58 – Tensões σ_x considerando crescimento otimizado do módulo de elasticidade: topo da camada

- Análise termo-mecânica: tensões σ_y**

O campo de tensões σ_y não é muito afetado pela alteração do crescimento do módulo elasticidade (ver Fig.5.59 a Fig.5.62). Apenas se verifica uma ligeira diminuição das trações no betão, porque o módulo de elasticidade assume valores mais baixos nas primeiras horas. Há um alívio destas tensões de tração, porque o betão está com menos rigidez e consegue deformar com maior facilidade.



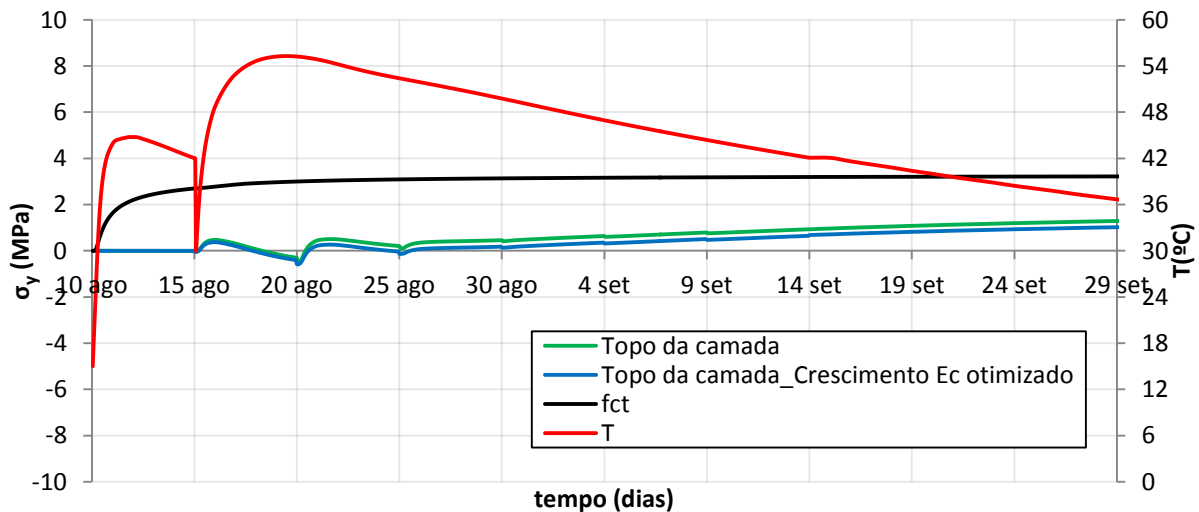


Fig.5.61 – Tensões σ_y considerando crescimento otimizado do módulo de elasticidade: topo da camada

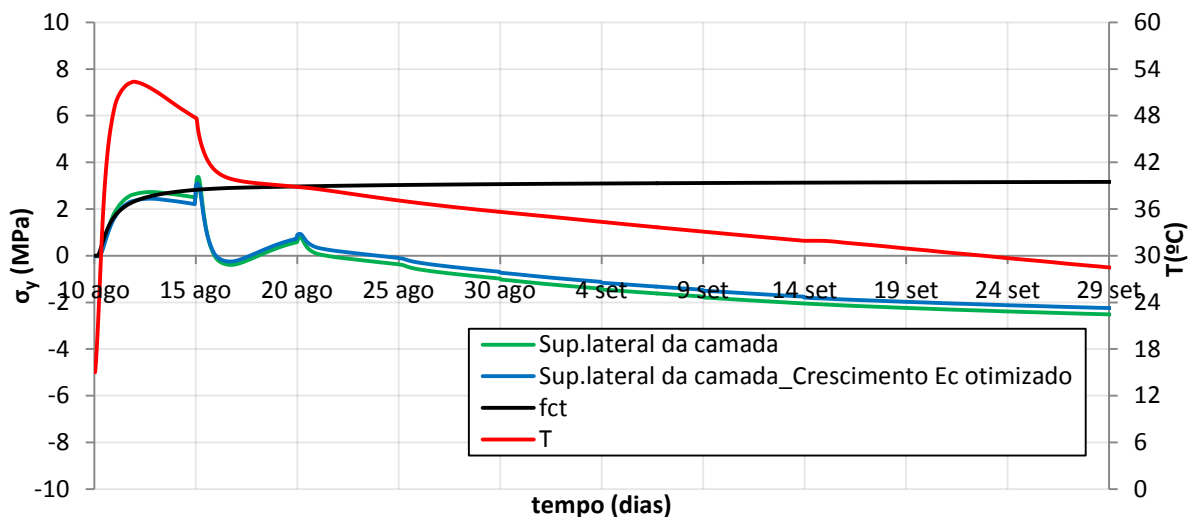


Fig.5.62 – Tensões σ_y considerando crescimento otimizado do módulo de elasticidade: superfície lateral

- **Análise termo-mecânica: tensões σ_z**

O maior impacto da alteração do crescimento do módulo de elasticidade é sem dúvida nas tensões para fora do plano. Nesta direção o betão está completamente restringido (não sofre deslocamentos), logo a mais pequena alteração da rigidez terá sempre consequências relevantes.

O betão tem menos rigidez nos primeiros instantes, como tal acaba por permitir a ocorrência das mesmas deformações para menores valores de tensão.

A diminuição da pré-compressão inicial poderá constituir um problema. Já tinha sido verificado que as tensões σ_z na camada de betão tendem a assumir valores de tração com o decorrer do tempo. Se a compressão inicial não for tão acentuada, devido ao crescimento mais lento do módulo de elasticidade, estas tensões de tração poderão aparecer em idades mais prematuras.

Tendo em consideração a situação anteriormente referida e sabendo que não estão previstos ensaios para este betão, que permitam avaliar o crescimento do módulo de elasticidade, é necessário referir

que a data de aparecimento de fendas devido a estas tensões, está condiciona pela evolução do verdadeiro módulo de elasticidade do betão, utilizado para o pilar de descarregados de cheias.

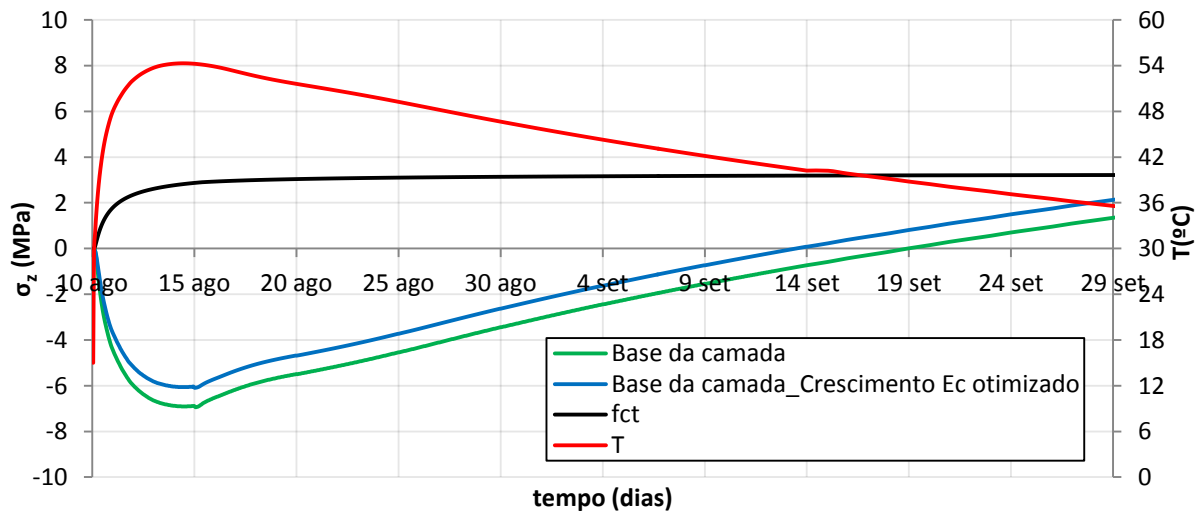


Fig.5.63 – Tensões σ_z considerando crescimento otimizado do módulo de elasticidade: base da camada

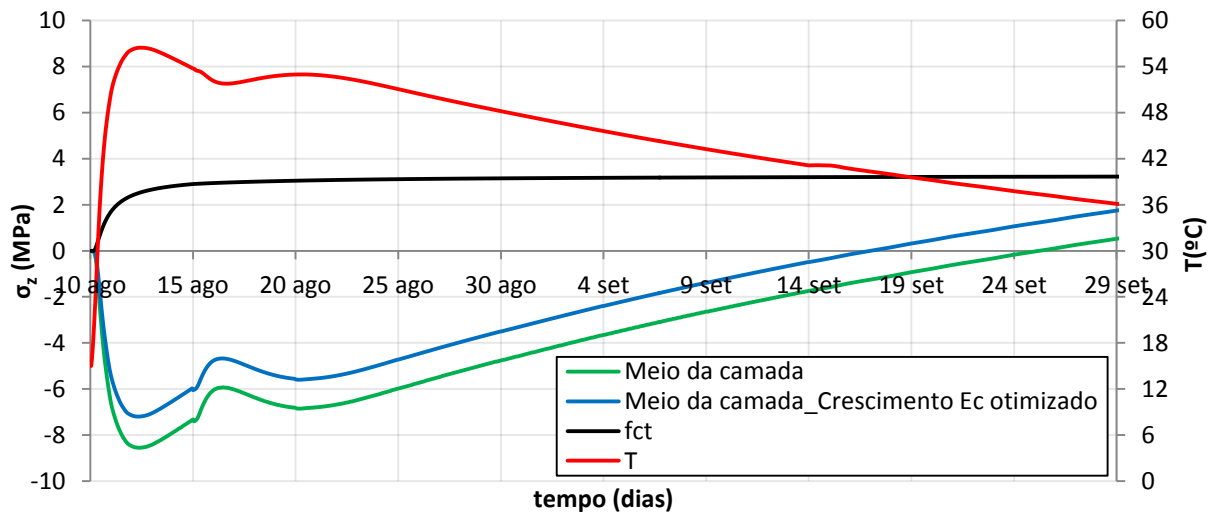


Fig.5.64 – Tensões σ_z considerando crescimento otimizado do módulo de elasticidade: meio da camada

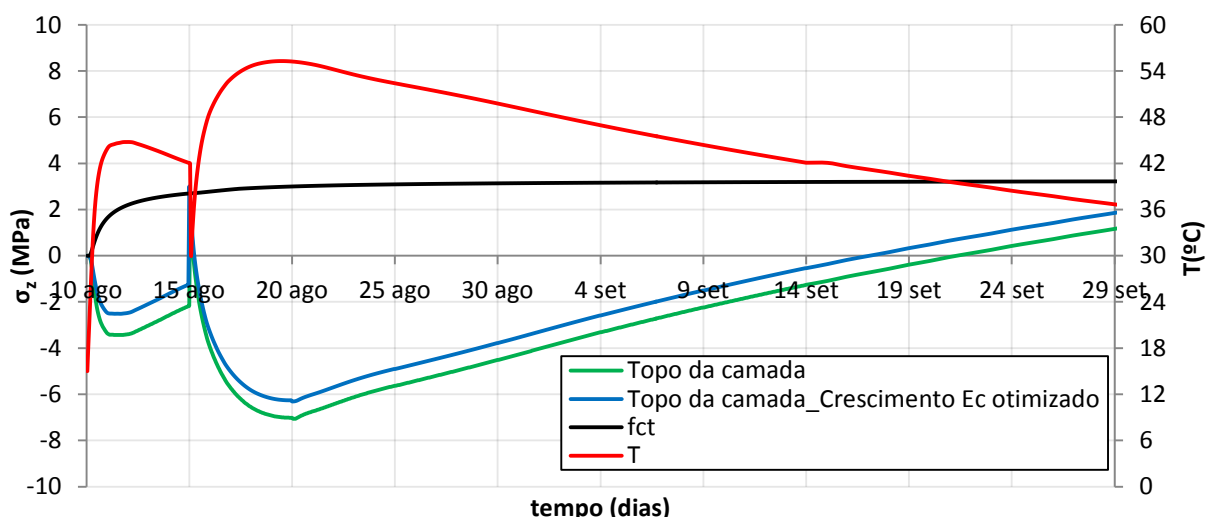


Fig.5.65 – Tensões σ_z considerando crescimento otimizado do módulo de elasticidade: topo da camada

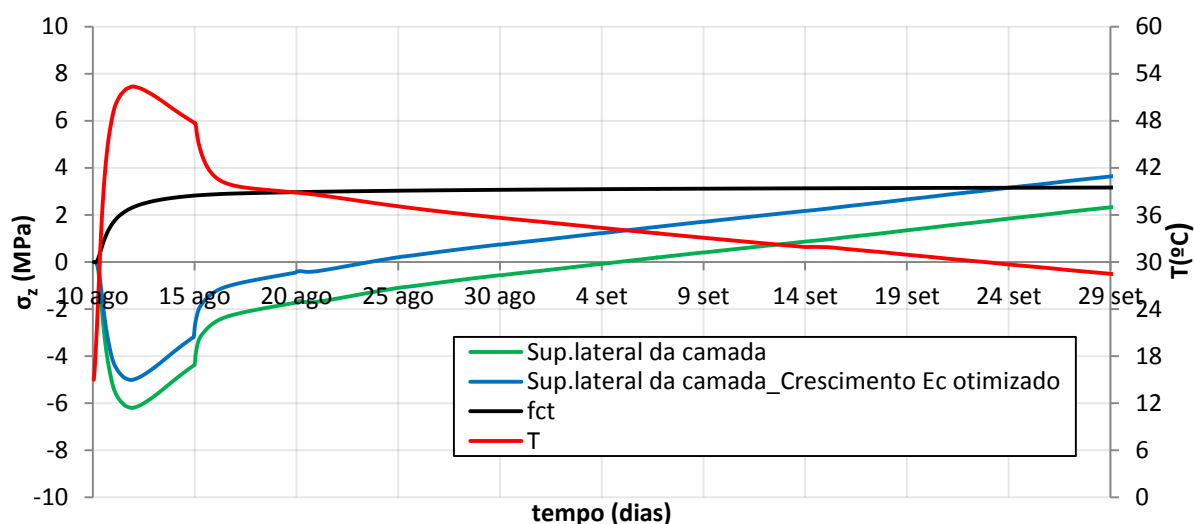


Fig.5.66 – Tensões σ_z considerando crescimento otimizado do módulo de elasticidade: superfície lateral

5.3.6. CONCLUSÕES DA INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

5.3.6.1. Potenciais padrões de fendilhação

As análises apresentadas ao longo deste capítulo permitem retirar conclusões sobre eventuais padrões de fendilhação. Obviamente que o aparecimento de certas fendas está condicionado por diversos fatores, tais como aqueles que foram abordados ao longo deste capítulo. No entanto, ficam aqui apresentados de forma qualitativa os padrões de fendilhação mais prováveis (ver Fig.5.67 e Fig.5.68):

- 1 - Fendilhação superficial devido a tensões σ_x
- 2 - Fendilhação superficial devido a tensões σ_y
- 3 - Fendilhação no núcleo da camada devido a tensões σ_y
- 4 - Fendilhação superficial nas faces laterais devido a tensões σ_z

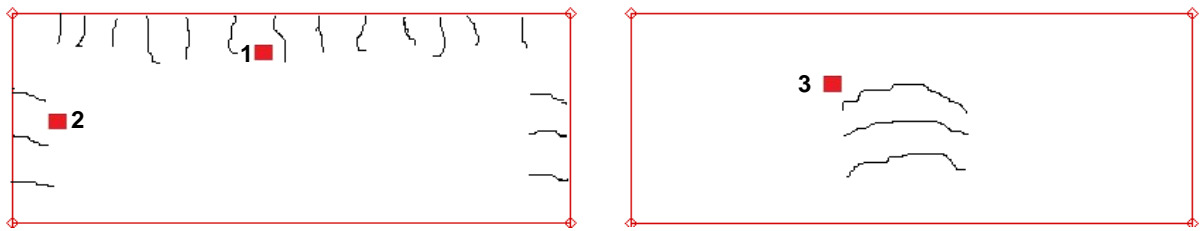


Fig.5.67 – Camada representativa do pilar de descarregador de cheias (corte transversal) e eventuais padrões de fendilhação nos primeiros 5 dias (esquerda) e em idades posteriores (direita)

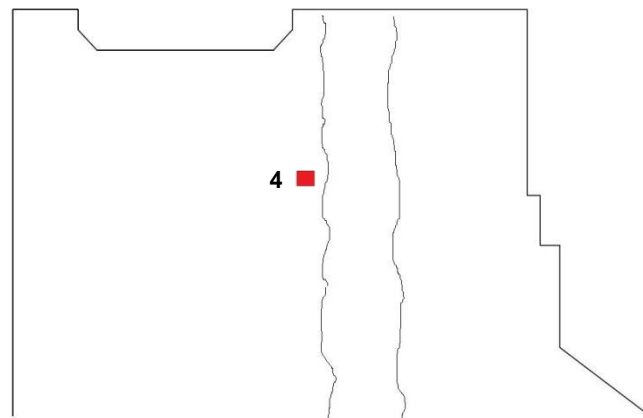


Fig.5.68 – Corte longitudinal do pilar de descarregador de cheias e eventuais padrões de fendilhação

As fendas representadas pelo número 1 não constituem um dano estrutural significativo, uma vez que a betonagem das camadas adjacentes vai permitir que estas sejam preenchidas com betão fresco.

As fendas que se encontram representadas pelo número 2 não representam um problema importante, porque para além da existência de uma forte armadura junto às faces, em idades mais avançadas as tensões σ_y nas faces laterais vão assumir valores de compressão e provavelmente vão permitir que estas comecem a fechar.

Sinalizadas com o número 3 estão representadas fendas no interior do betão. O aparecimento destas fendas acaba por depender muito da data de betonagem e dos parâmetros da lei da dupla potência que melhor caracterizam a fluência deste betão. No momento em que aparecem, o betão já se encontra comprimido nas faces laterais, logo não atravessam as camadas de um lado ao outro.

As fendas representadas pelo número 4 poderão ser mais preocupantes. De acordo com as conclusões apresentadas neste capítulo, com o decorrer do tempo de análise as tensões σ_z tendem a assumir valores de tração elevados em zonas interiores no betão. Logo, é necessário saber se estas fendas que surgem na superfície lateral conseguem atravessar o pilar pelo seu interior antes da aplicação do pré-esforço.

A betonagem no fim da Primavera parece garantir um período mais alargado até ao aparecimento destas fendas, dando por isso mais margem para a conclusão dos trabalhos de betonagem e subsequente aplicação do pré-esforço. Para além disso, é necessário ter em conta que este modelo sobrestima as tensões para fora do plano.

5.3.6.2. Medidas preventivas e alterações ao projeto

De modo a evitar o aparecimento de fendas, é necessário adotar certas medidas preventivas, que estejam em concordância com o tipo de fendas que ocorrem no pilar de descarregador de cheias.

Algumas das soluções não são muito dispendiosas e podem ser facilmente implementadas. Sendo assim ficam aqui algumas soluções propostas para a minimização destas fendas:

- Utilização de mantas no topo das camadas durante os primeiros 5 dias, de modo a isolar o betão do contacto com a temperatura ambiente. Os gradientes térmicos entre a temperatura ambiente e a temperatura do betão são os principais responsáveis pelo aparecimento de fendas verticais nessa zona.
- Utilizar uma cofragem com propriedades mais isolantes nas zonas laterais das camadas, de modo a evitar o aparecimento de fendas horizontais nestas zonas (fendas do tipo 2, Fig.5.67). Poder-se-á utilizar uma cofragem mais espessa, caso não seja possível usar outro material.
- Utilizar adições no betão em substituição parcial do cimento. A diminuição do teor de cimento implica diretamente uma redução das temperaturas do betão nas primeiras idades, mas também poderá provocar alterações à resistência à tração do betão. Uma solução destas tem de ser avaliada, de forma muito cautelosa, recorrendo a modelação numérica.
- Utilização de serpentinas de refrigeração. É uma solução muito utilizada em barragens, tal como referido no capítulo 3. No entanto, tendo em conta o caso de estudo, esta solução não parece ser a mais eficaz, porque é necessário um arrefecimento muito grande das temperaturas do betão durante os primeiros dias. Provavelmente seria mais razoável adotar uma solução que garantisse, de melhor forma, a resolução do problema em causa e eventualmente, caso fosse necessário, utilizar também serpentinas de refrigeração para complementar essa solução.

Juntamente com estas medidas deverá ser tido em conta que a melhor altura para betonar é no fim da Primavera/início do Verão, uma vez que esta solução reproduz menores riscos de fendilhação e fornece mais tempo até à aplicação do pré-esforço sem riscos significativos de fendilhação devida a σ_z .

O aumento do tempo de espera de betonagem entre camadas não é apresentado como solução, porque verifica-se que as fendas existentes nos topos e na superfície lateral das camadas aparecem antes dos primeiros 5 dias.

Uma eventual alteração do ritmo de betonagem teria que incidir na redução da espessura das camadas, e não na alteração dos tempos de espera.

5.3.6.3. Alteração do teor de cimento

Das soluções que foram apresentadas, a alteração do teor de cimento é muito provavelmente a melhor opção. A quantidade de cimento utilizada neste betão é muito elevada, e condiciona muito as temperaturas e as tensões no betão. Como tal, foi realizada mais uma análise (tendo por base a Análise de referência), a partir da diminuição do teor de cimento de 370Kg/m^3 para 300Kg/m^3 . No Anexo 5 poderão ser observados os mapas de tensões, temperaturas e índices de fendilhação relativos a este estudo.

Verifica-se que a diminuição do teor de cimento, para a quantidade anteriormente referida, não resolve os problemas da fendilhação superficial. As tensões de tração σ_x e σ_y continuam a ser muito elevadas no topo e na superfície lateral da camada, respetivamente. No entanto, verifica-se que a utilização desta quantidade de cimento permite uma redução das tensões de tração σ_y e σ_z nas zonas mais

interiores das camadas de betão. Isto é sem dúvida determinante, uma vez que permite reduzir a probabilidade de aparecimento de fendas do tipo 3 e a propagação das fendas do tipo 4 para zonas mais interiores do betão (ver Fig.5.67 e Fig.5.68)

As fendas do tipo 1 e 2 (Fig.5.67) estão relacionadas com o rápido arrefecimento das superfícies do betão, enquanto que as anteriormente referidas estão diretamente relacionadas com o lento arrefecimento do betão nas zonas mais interiores. A diminuição do teor de cimento reflete diretamente na redução das temperaturas no núcleo do betão e consequentemente reduz as tensões de tração nestas zonas.

Conclui-se que é necessário otimizar o teor de cimento utilizado para valores mais baixos, de modo a garantir a não formação destas fendas, uma vez que podem provocar danos estruturais sérios.

6

CONCLUSÕES

6.1. CONCLUSÕES GERAIS

Este trabalho teve como objetivo a realização de uma análise termo-mecânica dos pilares de um descarregador de cheias, de modo a determinar o risco de fendilhação associado às temperaturas geradas no betão durante a fase construtiva. É considerável o número de variáveis que condiciona os resultados obtidos por estas análises, como tal foi adotado um procedimento estratégico, que teve como primeiro objetivo determinar os fatores que mais condicionam as temperaturas do betão.

De modo a cumprir este objetivo foi elaborado um Modelo Base, que pela sua simplicidade geométrica e número reduzido de elementos finitos, permitiu a realização de um vasto número de análises térmicas de forma expedita. Estas análises foram fundamentais para a determinação dos fatores que mais condicionam as temperaturas no betão e permitiram retirar conclusões, que foram levadas em consideração na elaboração do modelo do pilar de descarregador de cheias.

Verificou-se que a temperatura de colocação do betão, a temperatura ambiente, o processo construtivo e a radiação solar são fatores que condicionam muito o comportamento térmico do betão. A radiação solar produziu resultados um pouco surpreendentes, já que foi possível verificar que em condições de céu limpo, no Verão, é possível atingir temperaturas nas zonas mais interiores do betão superiores em 3°C, relativamente ao esperado caso não se considerasse esse fenómeno.

Para além disso, ao nível do campo de temperaturas nas zonas mais superficiais do betão verificou-se que se podem atingir picos de temperaturas superiores a 60°C. Logo, este fenómeno é extremamente penalizante na análise de risco de fendilhação superficial. A solução adotada para a correta modelação deste fenómeno no modelo final consistiu numa majoração das temperaturas médias mensais do ar, de modo a compensar o efeito da radiação solar.

Posteriormente foi realizado o modelo do pilar de descarregador de cheias (modelo 2D em estado plano de deformação) em que foi possível elaborar um conjunto vasto de análises. Primeiramente analisou-se o efeito da calendarização da construção, de modo a determinar a melhor data para o início da construção do pilar.

A temperatura ambiente e a temperatura de colocação do betão são as principais condicionantes da escolha da melhor data para a betonagem. Dentro das datas apresentadas, verificou-se que a melhor data para o início da betonagem é no fim da Primavera/início do Verão. Contudo, também se averiguou que em todas as hipóteses propostas, os riscos de fendilhação são elevados, sendo necessário adotar outras soluções complementares.

A variação das propriedades mecânicas do betão, como por exemplo, a consideração da evolução do coeficiente de dilatação térmica, a alteração do crescimento do módulo de elasticidade e ainda a adoção de diferentes parâmetros para a lei da dupla potência, permitiram concluir que o campo de tensões no betão depende muito da variação destas características mecânicas, sendo que é necessário usufruir de dados relativos a estas variáveis, de modo a determinar resultados mais fiáveis para as tensões instaladas no betão no final da fase construtiva.

Na sua essência, este trabalho permitiu concluir que a fiabilidade dos resultados obtidos pelas análises termo-mecânicas depende sempre de um vasto conjunto de variáveis, sendo que muitas vezes é necessário adotar cenários hipotéticos durante a fase construtiva.

Relativamente ao caso de estudo abordado nesta dissertação, referente aos pilares do descarregador de cheias do Aproveitamento Hidroelétrico de Ilisu, a principal conclusão que se retirou foi a inviabilidade da utilização do teor de cimento proposto inicialmente. No capítulo correspondente a estes estudos verificou-se que com um teor de 300 Kg/m^3 em vez dos propostos 370 Kg/m^3 é possível reduzir consideravelmente o risco de fendilhação devido ao arrefecimento lento do betão nas zonas mais interiores das camadas. Comprova-se neste trabalho que a diminuição do teor de cimento é a solução mais eficaz para a resolução do problema em causa.

Relativamente a questões relacionadas com a fendilhação superficial das camadas será possível adotar soluções mais relacionadas com o processo construtivo. Tendo sido já referidas neste trabalho, soluções coma a utilização de cofragens mais espessas ou mais isolantes nas faces laterais, bem como a utilização de mantas nos topos das camadas, constituem boas medidas preventivas.

6.2. TRABALHOS FUTUROS

O desenvolvimento deste trabalho foi essencialmente condicionado pela falta de dados referentes às propriedades do betão, típica da fase de projeto de uma estrutura. A incerteza inerente às variáveis e aos pressupostos do modelo requer a realização de alguns trabalhos complementares de forma a validar o trabalho apresentado nesta dissertação.

O pressuposto mais importante de um modelo 2D realizado em estado plano de deformação é o facto de admitir que os deslocamentos para fora do plano são nulos. Este pressuposto condiciona muito as tensões obtidas na direção perpendicular ao plano. As análises apresentadas determinam uma probabilidade elevada de aparecimento de fendas devido a este tipo de tensões, sendo que estas poderão constituir um grave problema ao nível de danos estruturais, tal como já foi referido.

- De forma a validar os resultados obtidos recomenda-se a realização de um modelo 3D do pilar do descarregador de cheias. Deste modo será possível determinar com maior exatidão as tensões σ_z (fora do plano), bem como o risco de fendilhação associado a estas.
- Para além das questões relacionadas com as limitações do modelo, é aconselhável a realização de ensaios laboratoriais ao betão que se prevê utilizar. Estes ensaios deverão ter como objetivo a calibração dos parâmetros da lei da dupla potência, bem como a determinação da variação do módulo de elasticidade e do coeficiente de dilatação térmica. Deste modo, será possível determinar com maior exatidão o campo de tensões no betão.
- É necessário otimizar o teor de cimento utilizado neste betão. A quantidade de cimento proposta é muito elevada e condiciona o aparecimento de temperaturas e tensões de tração muito elevadas.
- De forma a validar as análises efetuadas, seria interessante dispor de temperaturas no betão durante a fase construtiva.

- Os estudos apresentados no capítulo 4 permitiram concluir que a radiação solar é determinante no campo térmico do betão. A solução usada para compensar este fenómeno baseou-se numa alteração da senoide da temperatura ambiente. Contudo, seria interessante usufruir de dados mais específicos acerca da radiação solar incidente no local da obra, de modo a calibrar o fator de turbidez e a conseguir prever com maior exatidão a influência deste fenómeno.

BIBLIOGRAFIA

- ACI Committee, 116. *Cement and concrete terminology*. American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 2000, 73 pp.
- Afonso, Clito. *Termodinâmica para engenharia*. Porto: FEUP edições, 2012.
- Altoubat, Salah A., Lange, David A. *Creep, shrinkage, and cracking of restrained concrete at early age*. ACI Materials Journal, 2001.
- Azenha, Miguel. *Comportamento do betão nas primeiras idades fenomenologia e análise termo-mecânica*. Dissertação de mestrado, FEUP, 2004.
- Azenha, Miguel. *Numerical simulation of the structural behaviour of concrete since its early ages*. Dissertação de Doutoramento, FEUP, 2009.
- Azenha, M., Faria, R. *Temperatures and stresses due to cement hydration on the R/C foundation of a wind tower - A case study*. Engineering Structures, 2008.
- Azenha, M., Faria, R., Figueiras, H. *Thermography as a technique for monitoring early age temperatures of hardening concrete*. Construction and Building Materials, 2011.
- Azenha, M., Faria, R., Ferreira, D. *Identification of early-age concrete temperatures and strains: monitoring and numerical simulation*. Cement and Concrete Composites, 2009.
- Azenha, M., Faria, R., Figueiras, H. *Thermography as a technique for monitoring early age temperatures of hardening concrete*. Construction and Building Materials, 2011.
- Azenha, M., Lameiras, R., Sousa, C., Barros, J. *Application of air cooled pipes for reduction of early age cracking risk in a massive RC wall*. Engineering Structures, 2014.
- Barcelo, L., Moranville, M., Clavaud, B. *Autogenous shrinkage of concrete: a balance between autogenous swelling and self-desiccation*. Cement and Concrete Research, 2005.
- Bason, Frank. *Diffuse solar irradiance and atmospheric turbidity*. SolData Instruments, 2004.
- Bazant, Z., Chern, J. *Log Double Power Law for Concrete Creep*. ACI Journal, 1985.
- Bjontegaard, O., Sellevold, Erik J. *Autogenous and thermal deformations*. RILEM REPORT, 2003.
- Cardoso, Manuel. *Estudo da espessura das camadas de betonagem e do ritmo de construção de uma barragem abóbada de grandes dimensões*. Dissertação de mestrado, Porto: FEUP, 2013.
- CEN, Eurocódigo 2. (EN 1992-1-1) - *Projeto de estruturas de betão. Parte 1.1: Regras gerais e regras para edifícios*, 2004.
- Cervera, M., Faria, R., Oliver, J., Prato, T. *Numerical modelling of concrete curing, regarding hydration and temperature phenomena*. Computers & structures, 2002.
- Conceição, J., Faria, R., Azenha, M., Mamede, F., Souza, F. *Estudo térmico nas primeiras idades do envolvimento em betão da espiral de uma turbina*. Encontro Nacional betão estrutural, FEUP, 2012.
- Critchell, Peter L. *Joints and cracks in concrete*. CR Books, 1968.
- De Schutter, G., Kovler, K. *Early age cracking in cementitious systems*. RILEM Publications s.a.r.l, 2003.
- De Witte, F., Jansen, J. *DIANA User's Manual (release 9.4.4)*. TNO Building and Construction Research, Delft, The Netherlands, 1998.

- Derron, A Stucky MH. *Problèmes thermiques posés par la construction des barrages-reservoirs*. Science et Technique, 1957.
- Faria, R., Azenha, M., Figueiras, J. *Modelling of concrete at early ages: Application to an externally restrained slab*. Cement and concrete composites, 2006.
- Ferreira, D., Azenha, M., Faria, R. *Monitorização do comportamento do betão nas primeiras idades: validação experimental de modelos numéricos*. Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões, 2008.
- Gutsch, A., Rostásy, F. *Mechanical models of the stress-strain behaviour of young concrete in axial tension and compression*. IPACS Document, SubTask 3.3, 2001a.
- Ji, S., Zhu, Yue-ming. *Effect of Internal and External Constraints and Creep on Concrete Cracking Stress*. College of Water Conservancy and Hydroelectric Engineering, Hohai University, Nanjing, China, 2008.
- Jonasson, Jan-Erik. *Modelling of temperature, moisture and stresses in young concrete*. Doctoral Thesis, 1994, Lulea University of Technology, Lulea.
- Kim, J., Kim, K., Yang, J. *Thermal analysis of hydration heat in concrete structures with pipe-cooling system*. Computers & Structures, 2001
- Krüger, Denise. *Análise térmica transiente de estruturas de concreto executadas por camadas*. Dissertação de mestrado, 2001.
- Lameiras, R., Azenha, M., Barros, J. *Otimização do faseamento construtivo de estruturas constituídas por grandes volumes de betão: estudo do canal do descarregador de cheias de uma barragem*. 54º Congresso Brasileiro do Concreto, 2012.
- Leitão, L., Azenha, M., Faria, R. *Modelo termo-higro-mecânico: Descrição e aplicação do modelo aos provetes de betão estudados nas Tarefas 2 e 3*. Relatório referente ao projeto ptdc/ecm/099250/2008, Porto: FEUP, 2013.
- Rostásy, F., Gutsch, A., Krauß, M. *Computation of stresses and cracking criteria for early age concrete - Methods of iBMB*. IPACS Document, Task 3, 2001.
- Silva, Jorge. *Injeção de juntas de contração de barragens abóbada*, Dissertação de mestrado, Porto: FEUP, 2013.
- Silva, Luís. *Caracterização das propriedades termo-mecânicas do betão nas primeiras idades para aplicação estrutural*. Dissertação de mestrado, Porto: FEUP, 2007.
- Silveira, António F. *As variações de temperatura nas barragens*. Lisboa: LNEC, 1961.
- Silveira, António F. *O comportamento térmico das barragens de betão*. Lisboa: LNEC, 1958.
- Silveira, António P. *A influência das acções térmicas no comportamento de pontes de betão armado pré-esforçado*. Lisboa: LNEC, 1996.
- Soares, José. *Dimensionamento das armaduras de envolvimento da espiral de um grupo do gerador de central hidroelétrica*. Dissertação de mestrado, Porto: FEUP, 2012.
- Taylor, H., Famy, C., Scrivener, KL. *Delayed ettringite formation*. Cement and Concrete Research, 2001.
- Wang, Z., Li, G. *Experimental method and prediction model for autogenous shrinkage of high performance concrete*. Construction and Building Materials, 2013.

Yoo, S., Kwon, S-J., Jung, S. *Analysis technique for autogenous shrinkage in high performance concrete with mineral and chemical admixtures*. Construction and Building Materials, 2012.

ANEXOS

A1

MAPAS DE TENSÕES, ÍNDICE DE FENDILHAÇÃO E TEMPERATURAS: ANÁLISE DE REFERÊNCIA (VERÃO)

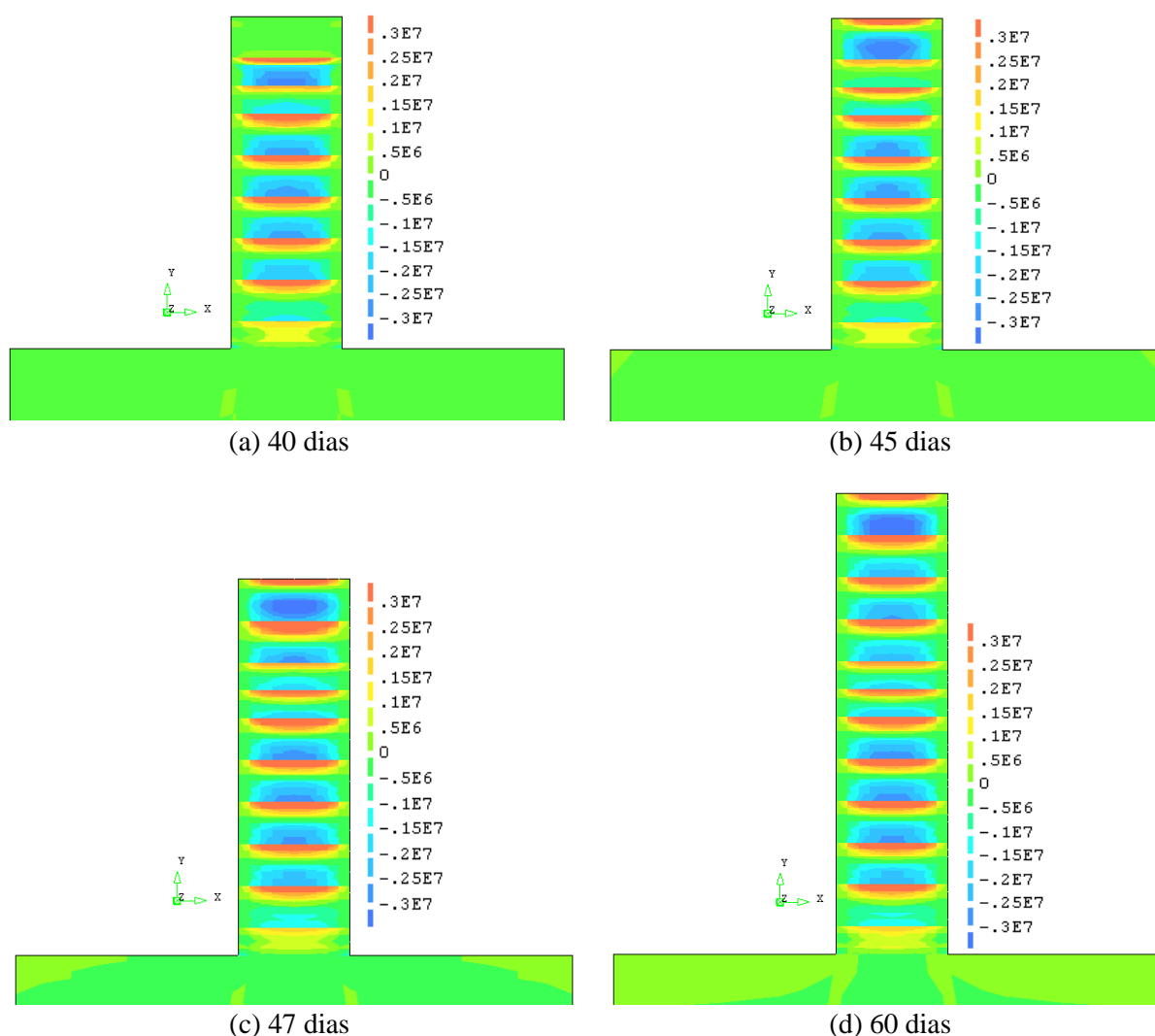


Fig.A1.1 - Mapa de tensões σ_x : Análise de Referência

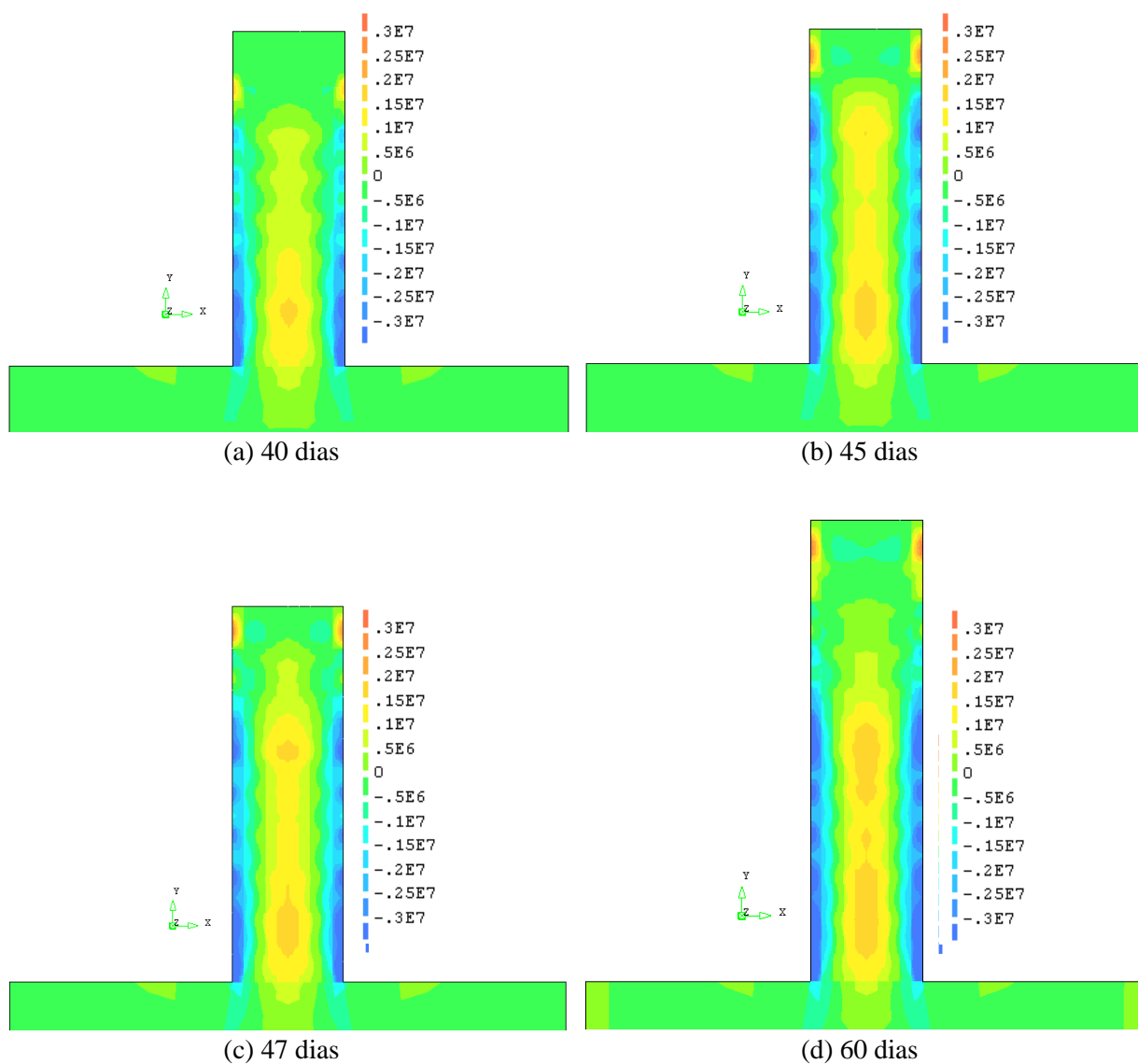


Fig.A1.2 - Mapa de tensões σ_y : Análise de Referência

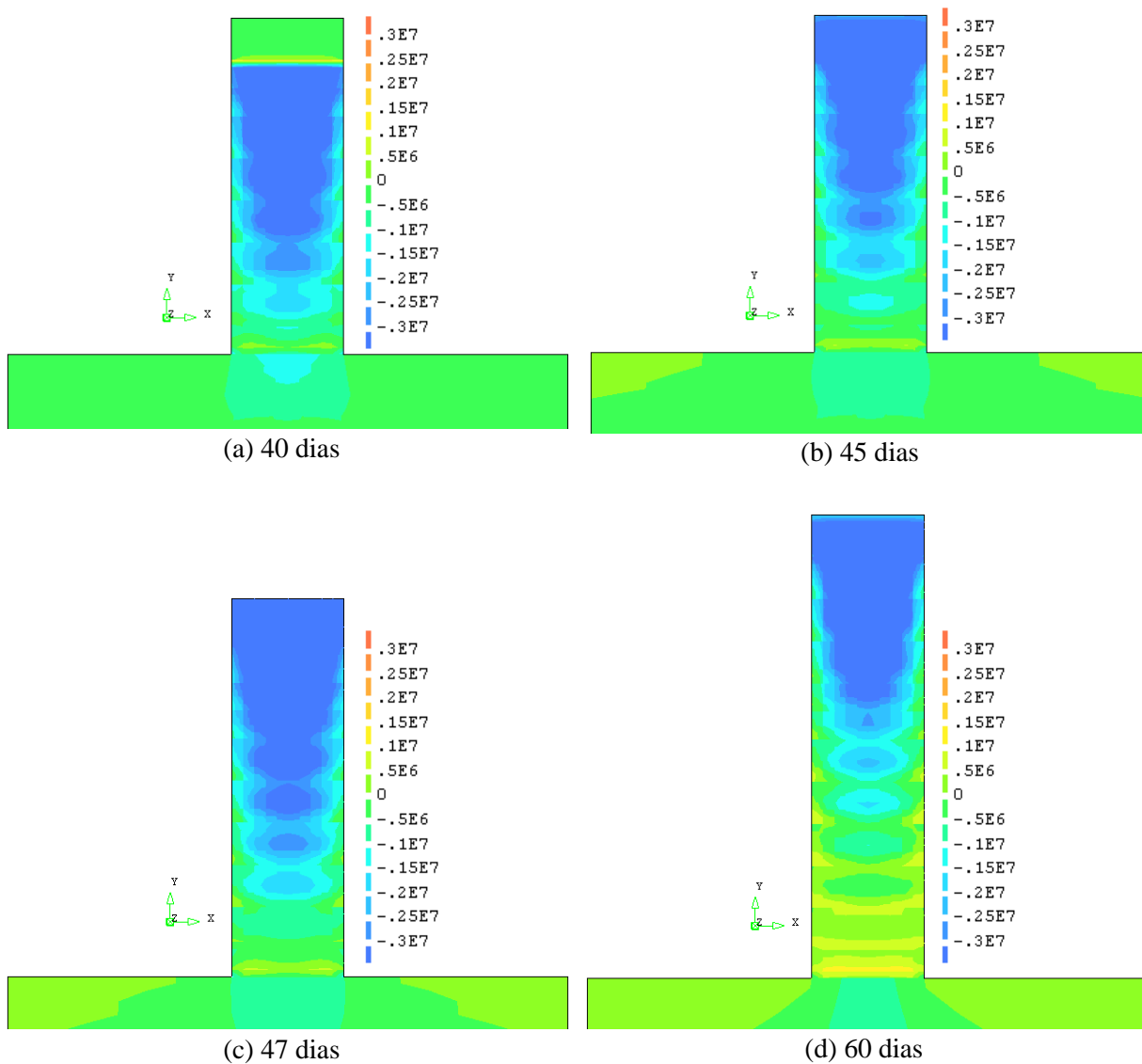


Fig.A1.3 - Mapa de tensões σ_z : Análise de Referência

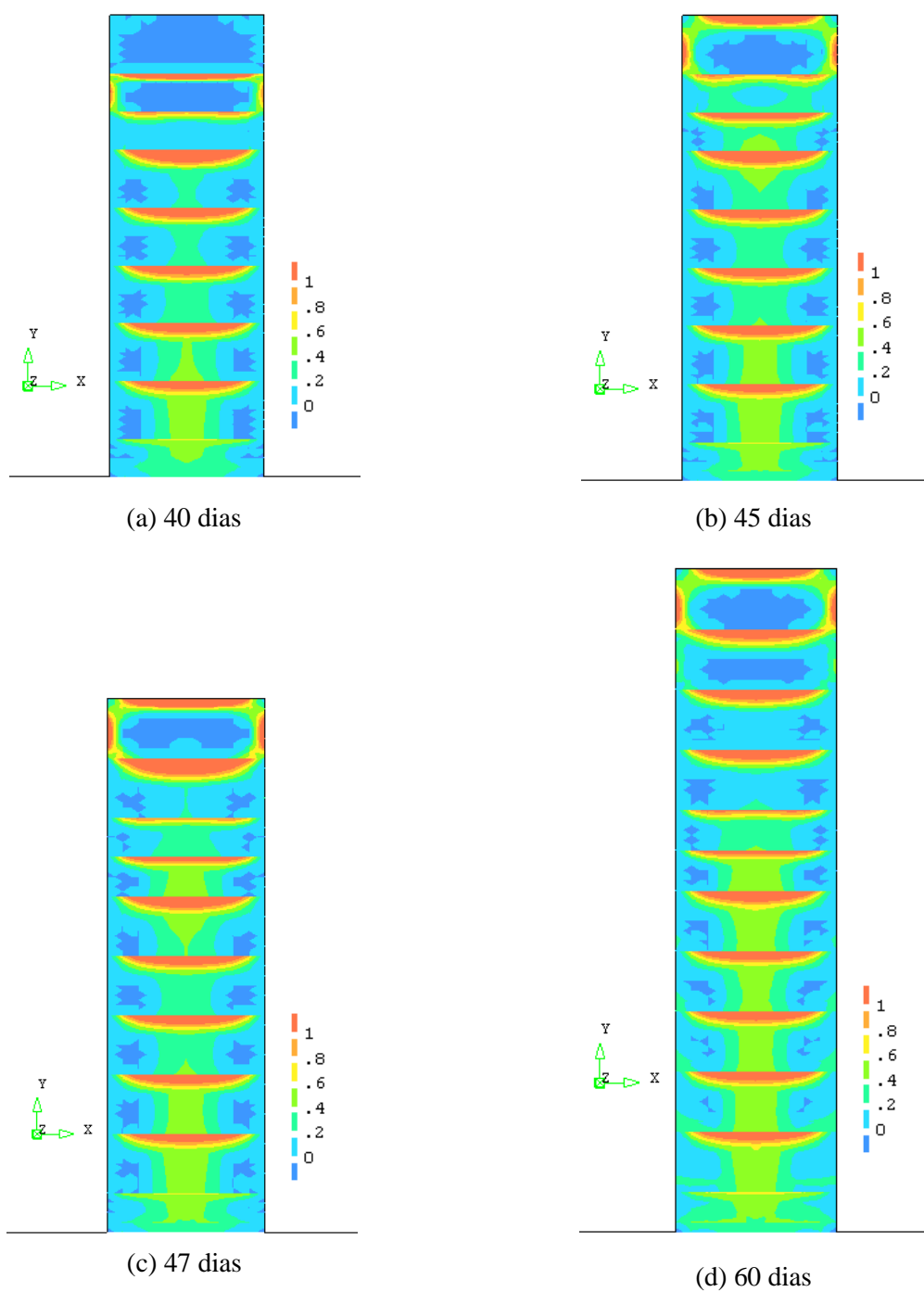


Fig.A1.4 - Mapas índice de fendilhação: Análise de Referência

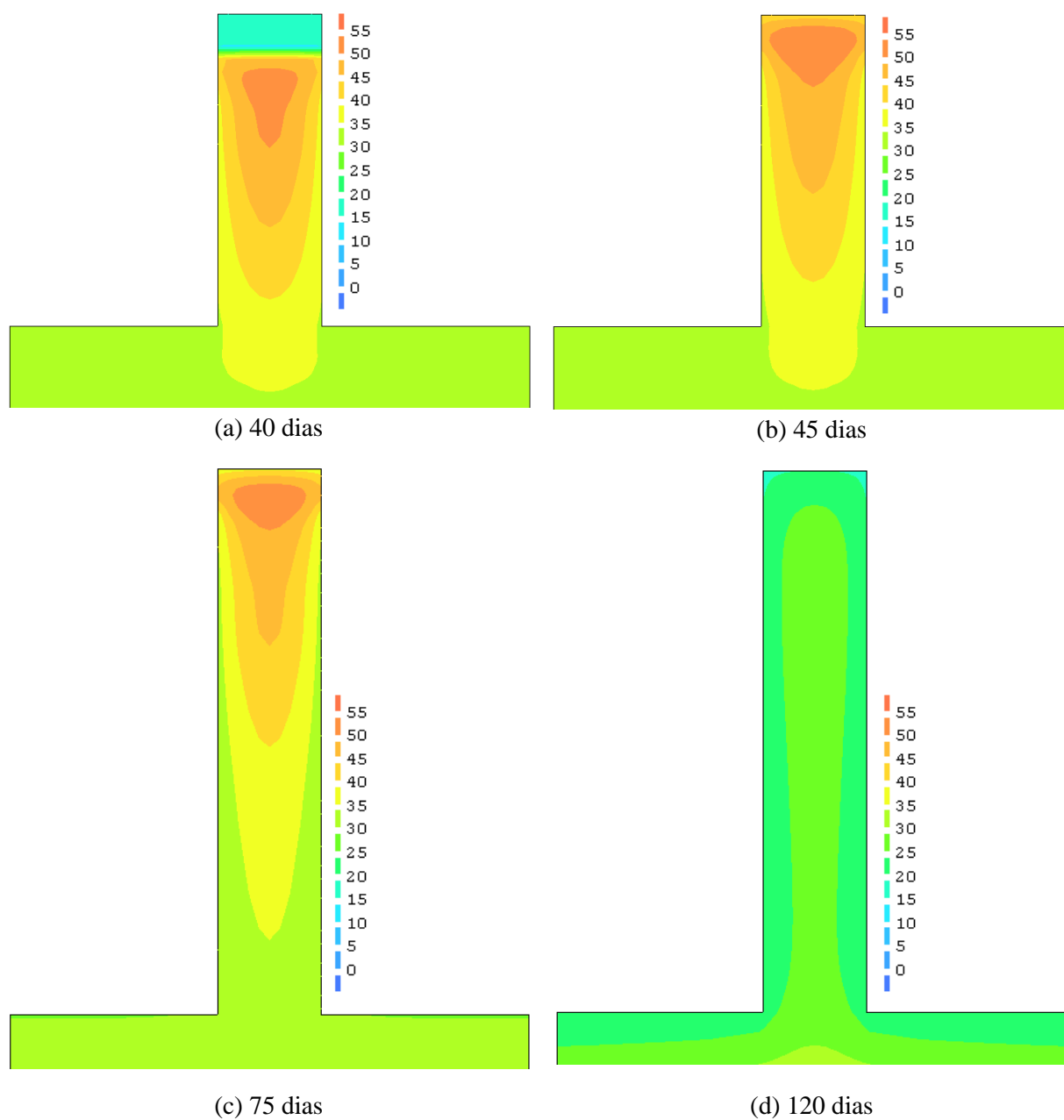


Fig.A1.5 - Mapas de variação de temperaturas: Análise de Referência

A2

MAPAS DE TENSÕES, ÍNDICE DE FENDILHAÇÃO E TEMPERATURAS: PRIMAVERA

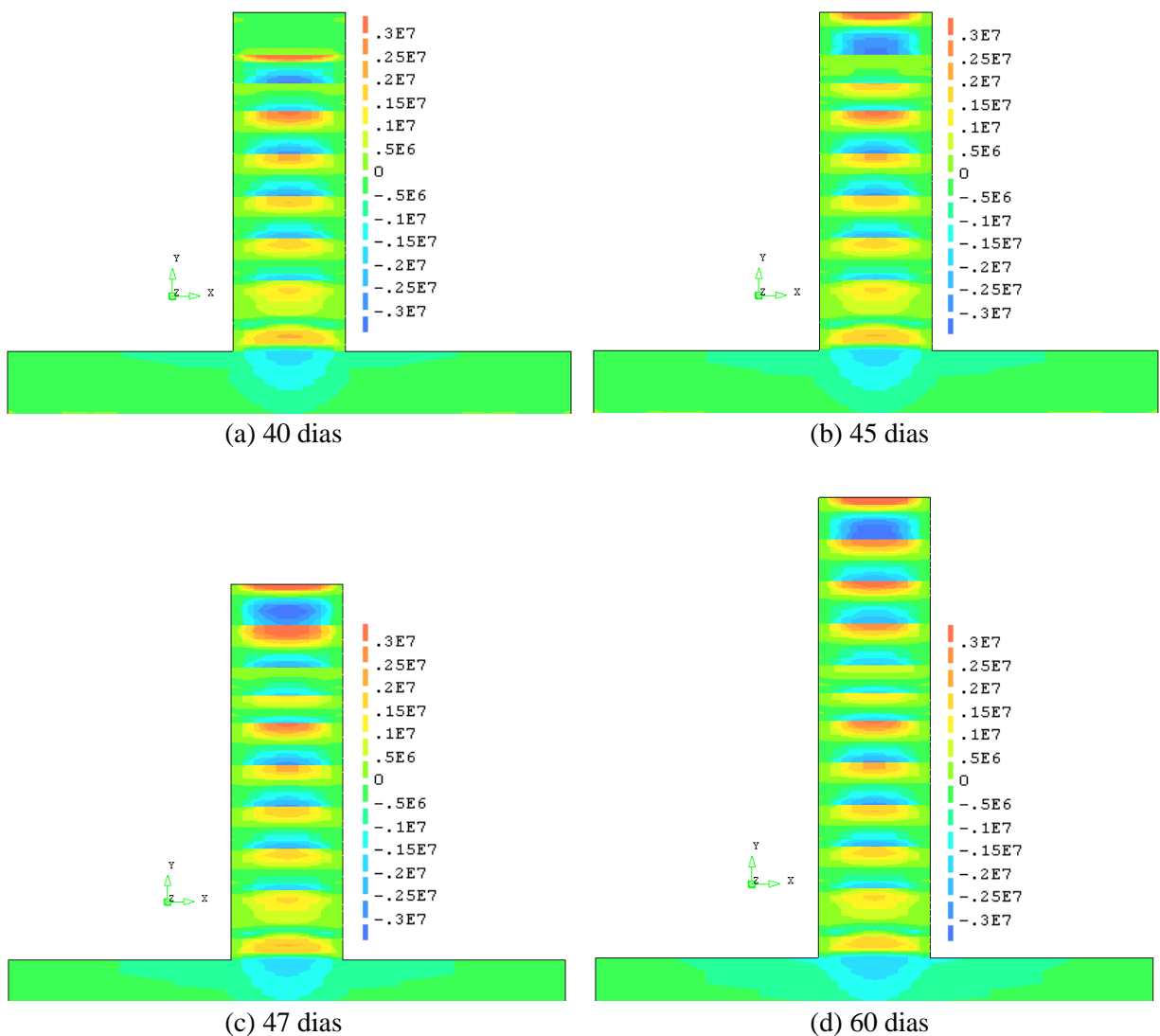


Fig.A2.1 - Mapa de tensões σ_x : Primavera

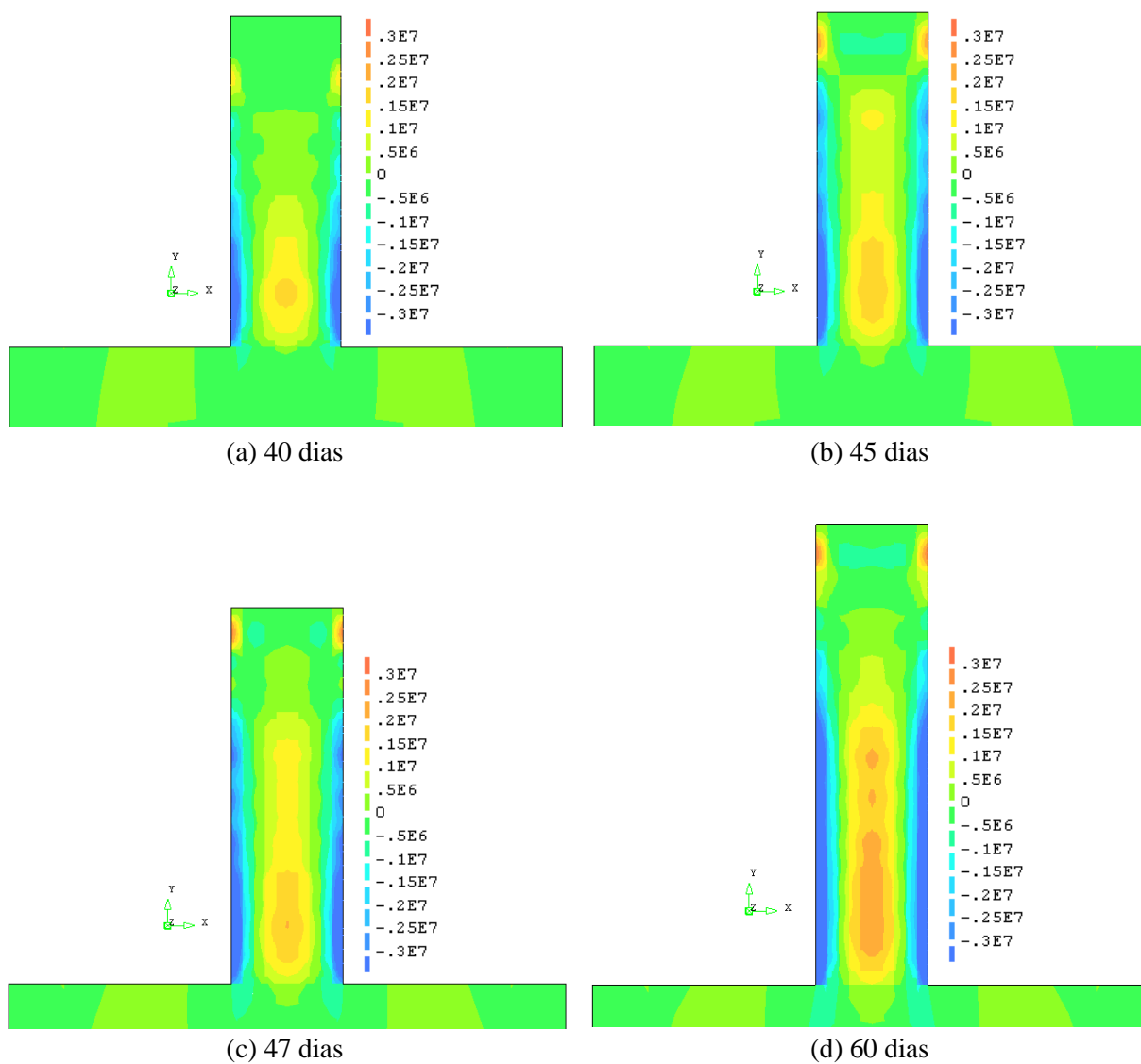


Fig.A2.2 - Mapa de tensões σ_y : Primavera

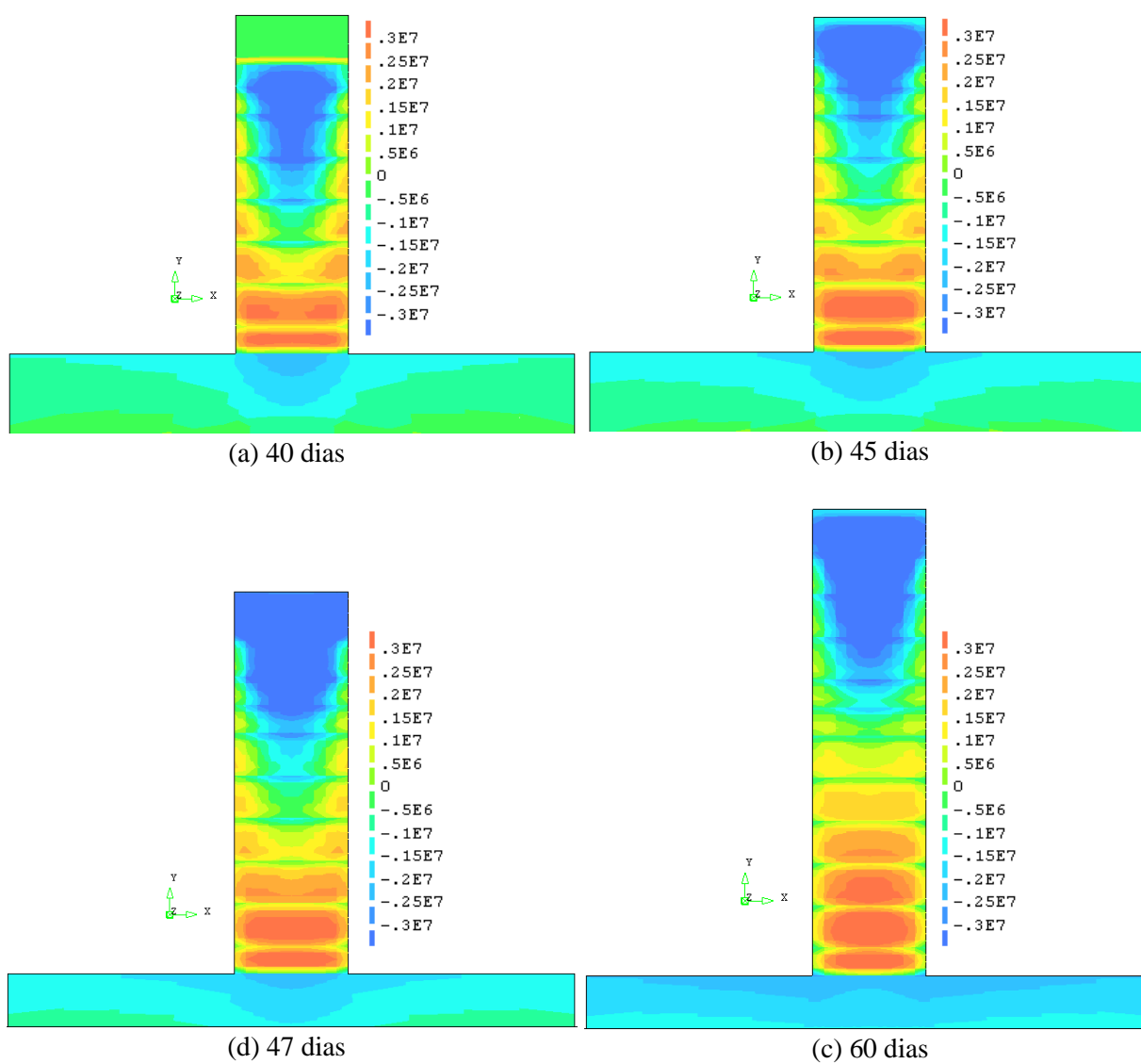


Fig.A2.3 - Mapa de tensões σ_z : Primavera

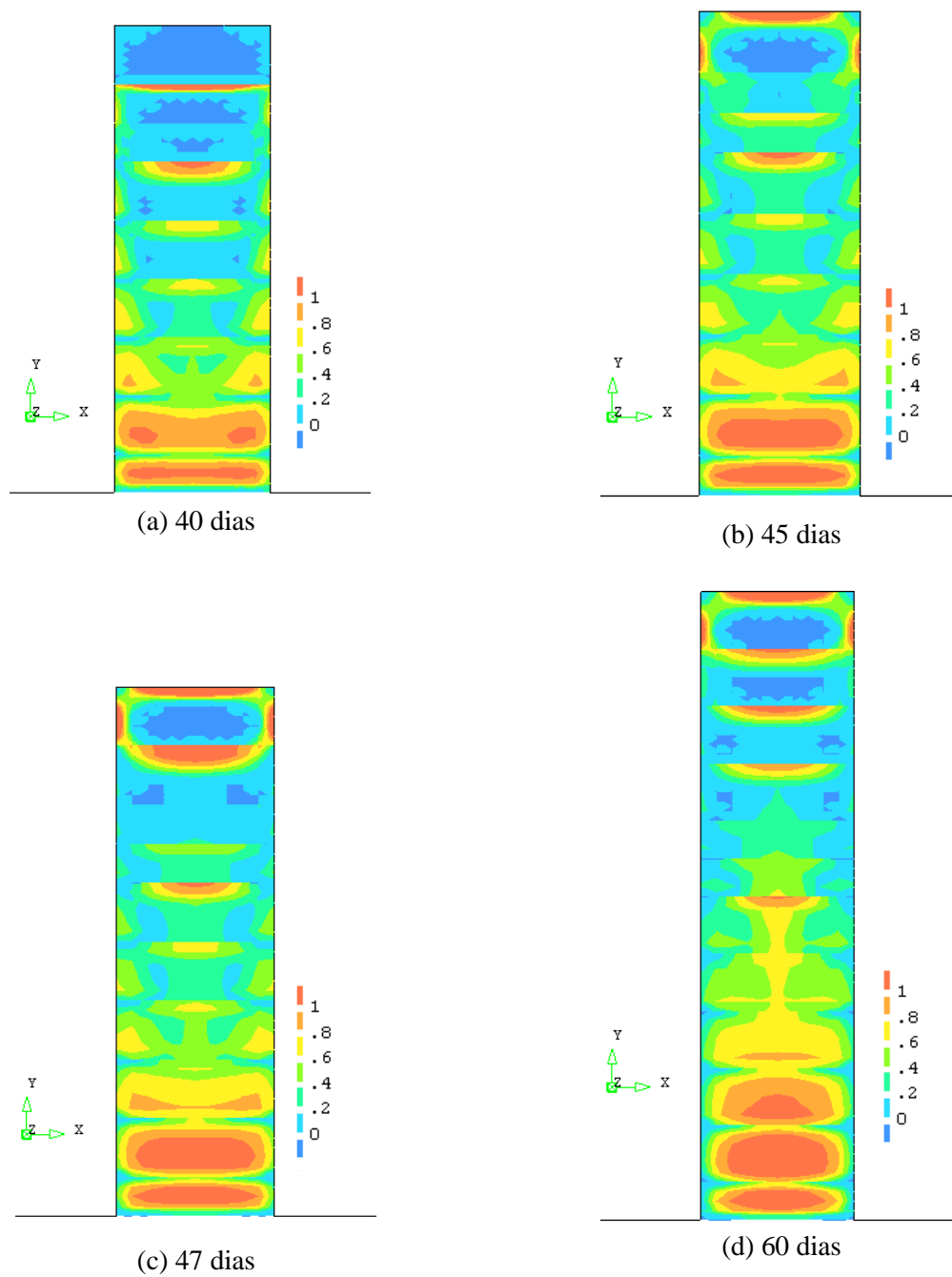


Fig.A2.4 - Mapas índice de fendilhação: Primavera

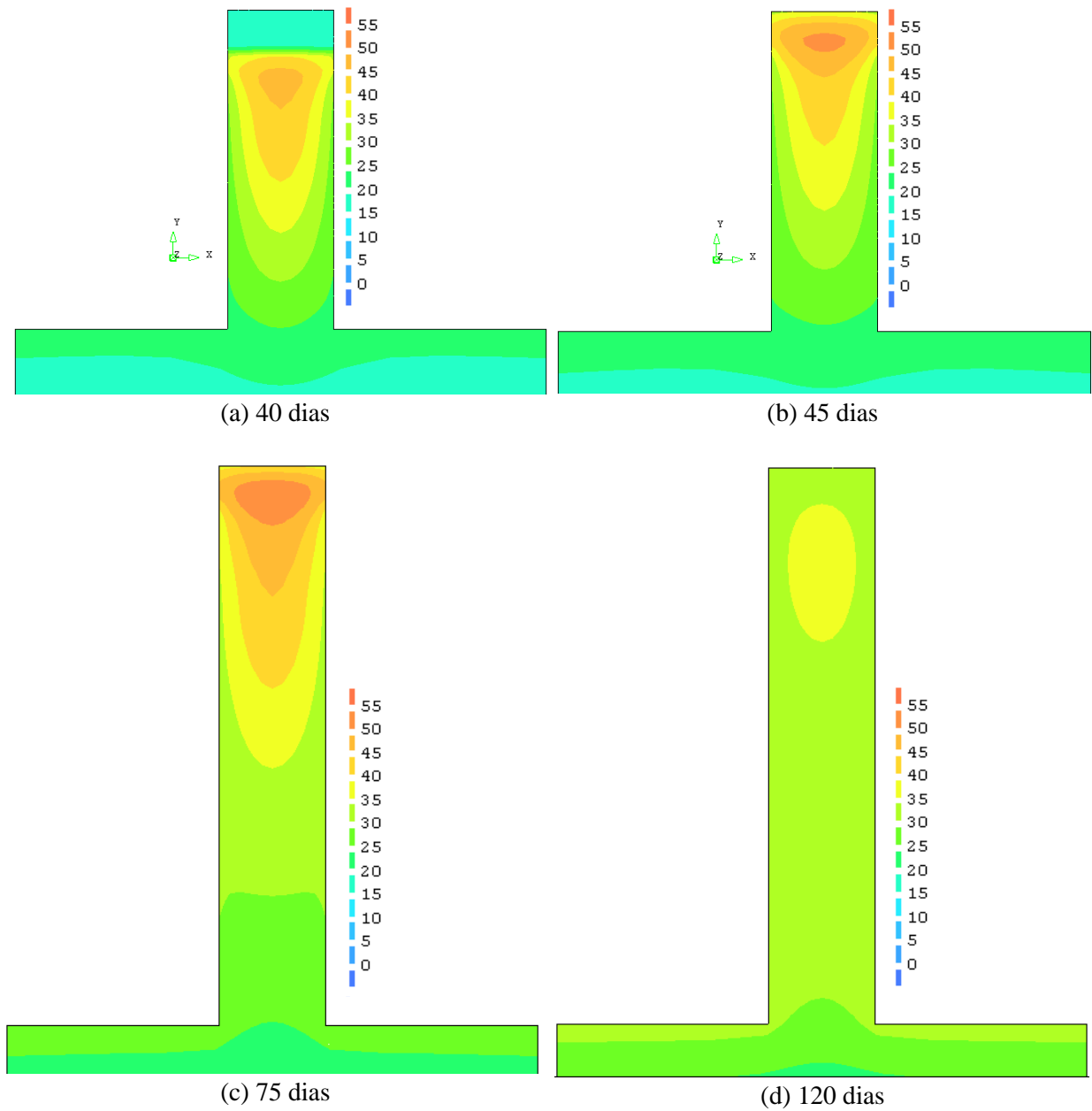


Fig.A2.5 - Mapas de variação de temperaturas: Primavera

A3

MAPAS DE TENSÕES, ÍNDICE DE FENDILHAÇÃO E TEMPERATURAS: OUTONO

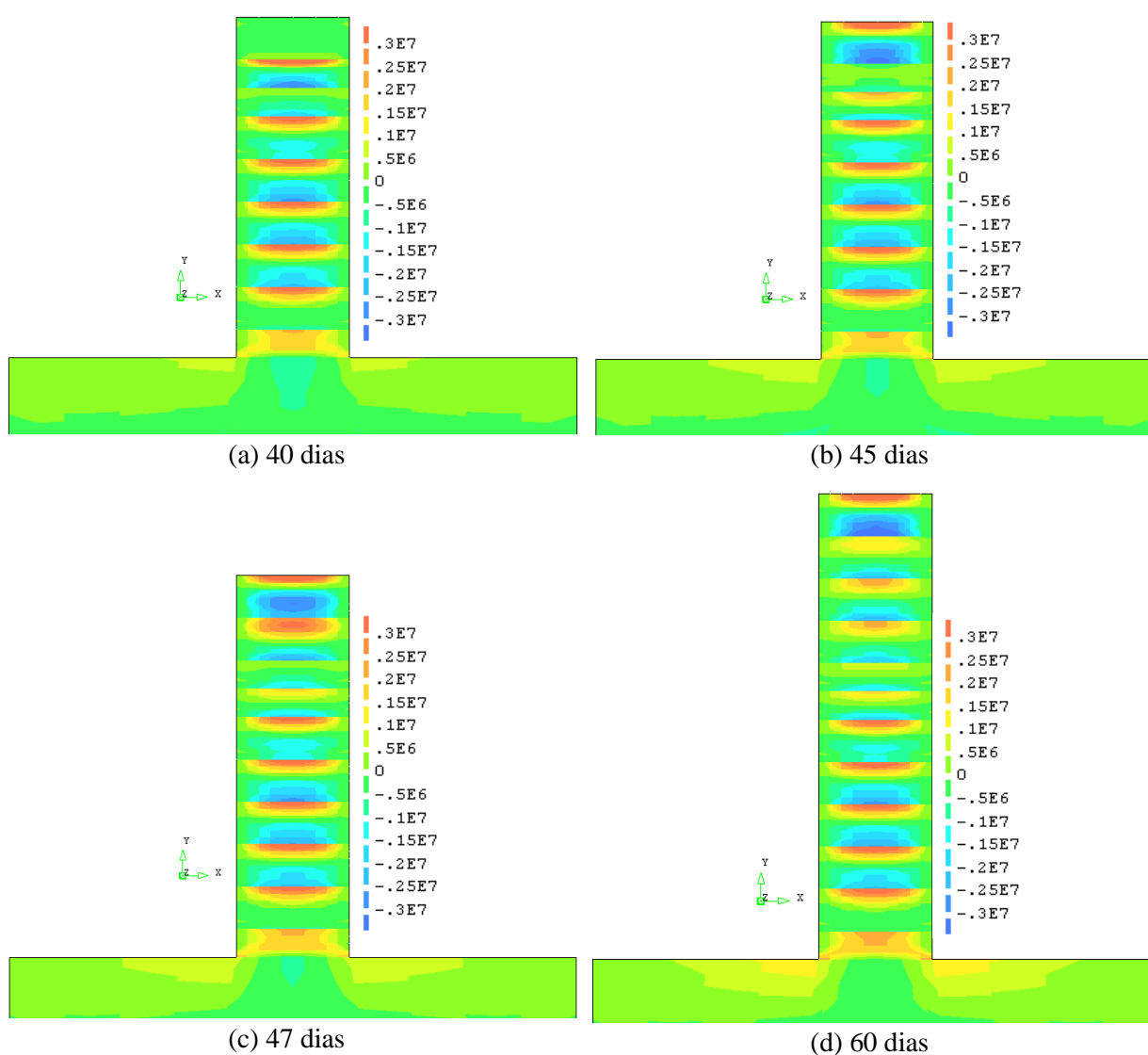


Fig.A3.1 - Mapa de tensões σ_x : Outono

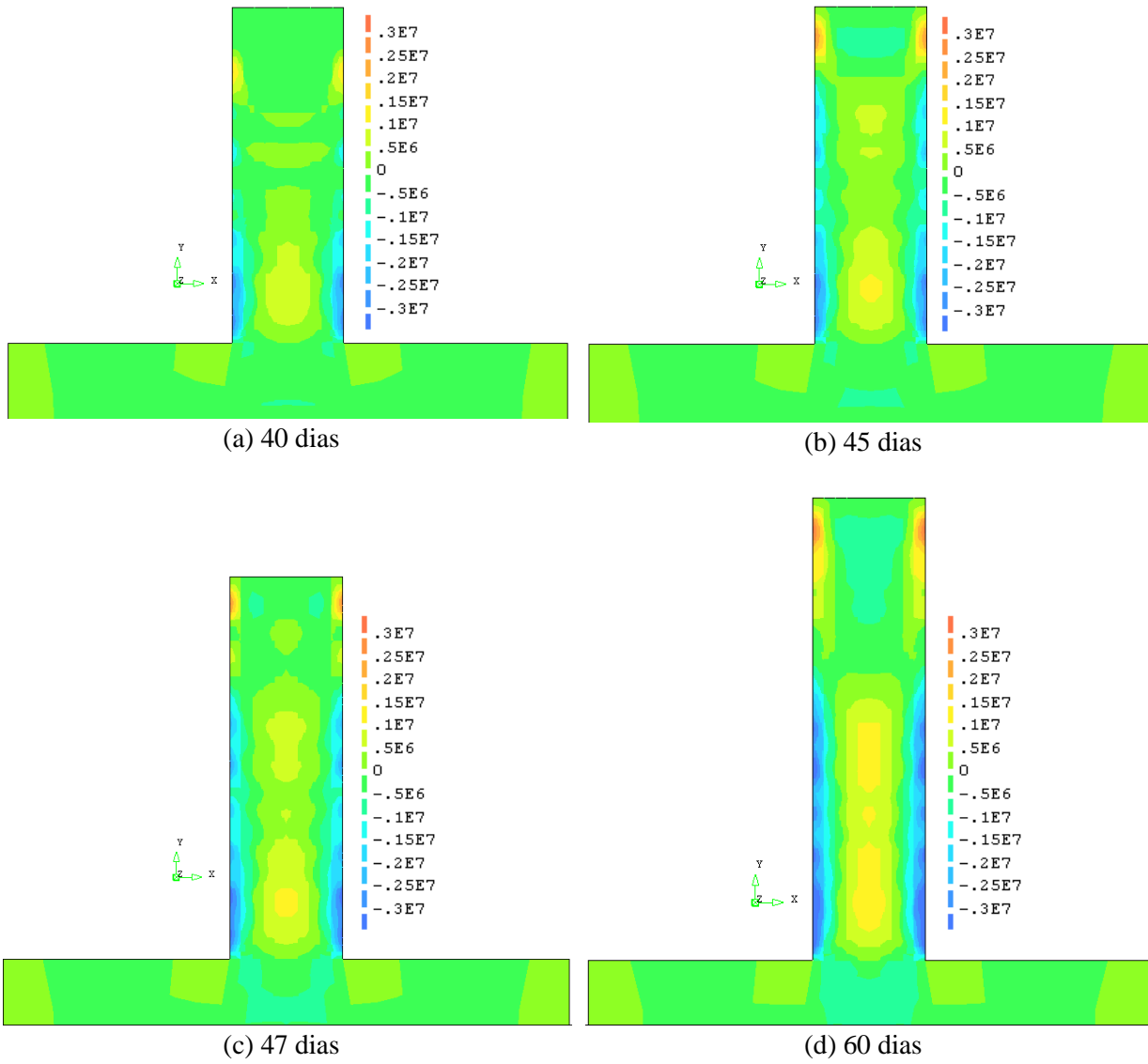


Fig.A3.2 - Mapa de tensões σ_y : Outono

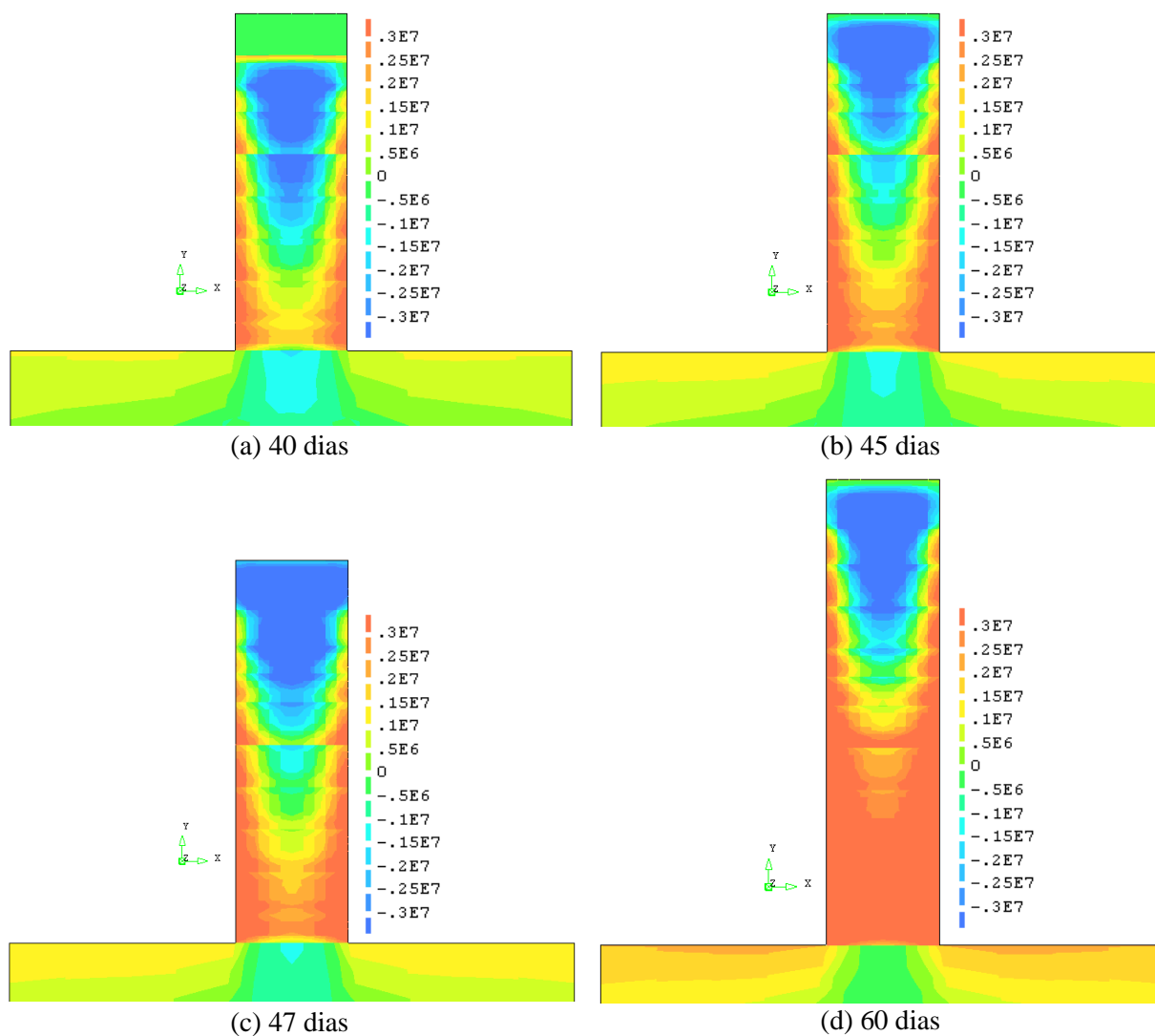


Fig.A3.3 - Mapa de tensões σ_z : Outono

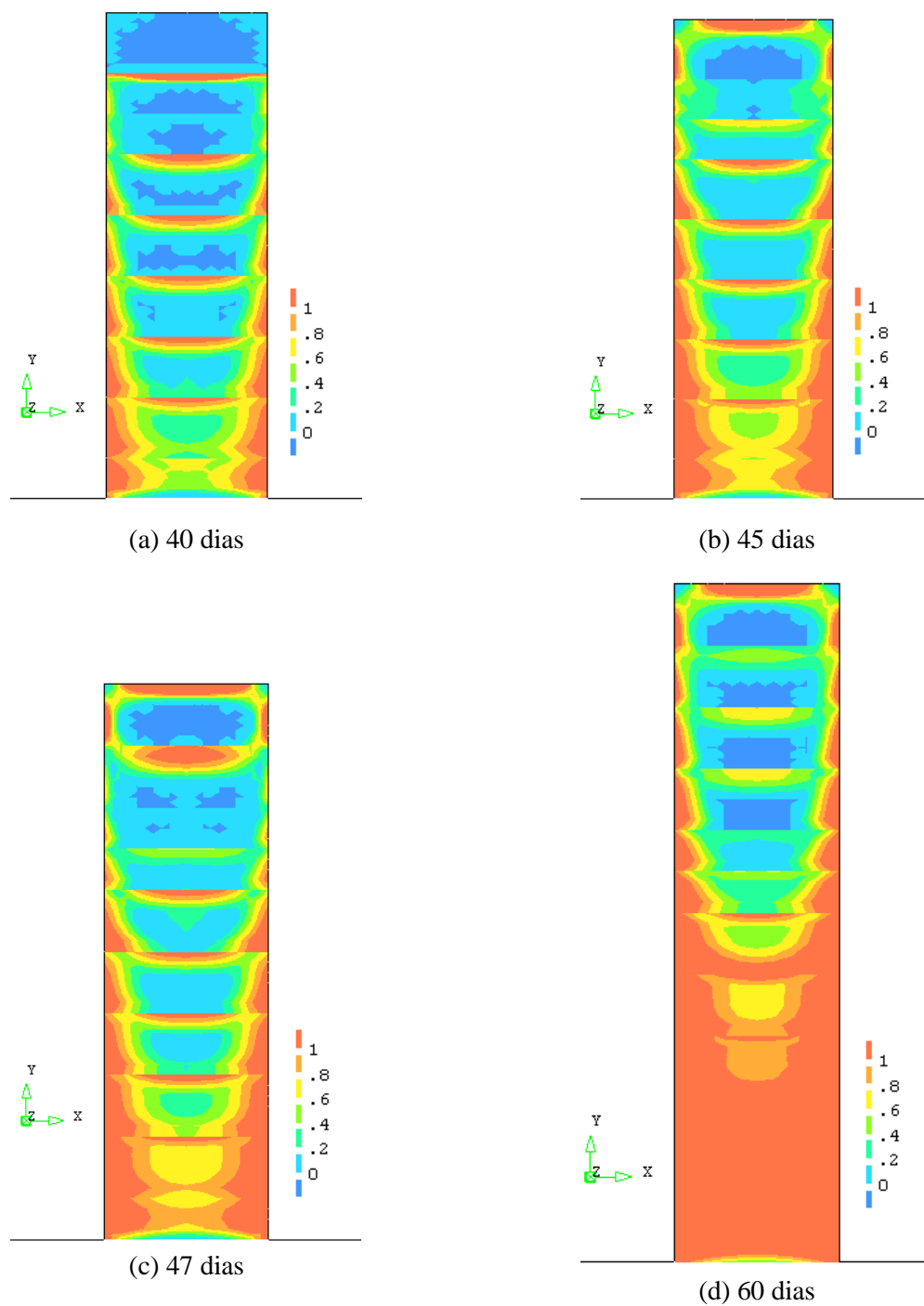


Fig.A3.4 - Mapas índice de fendilhação: Outono

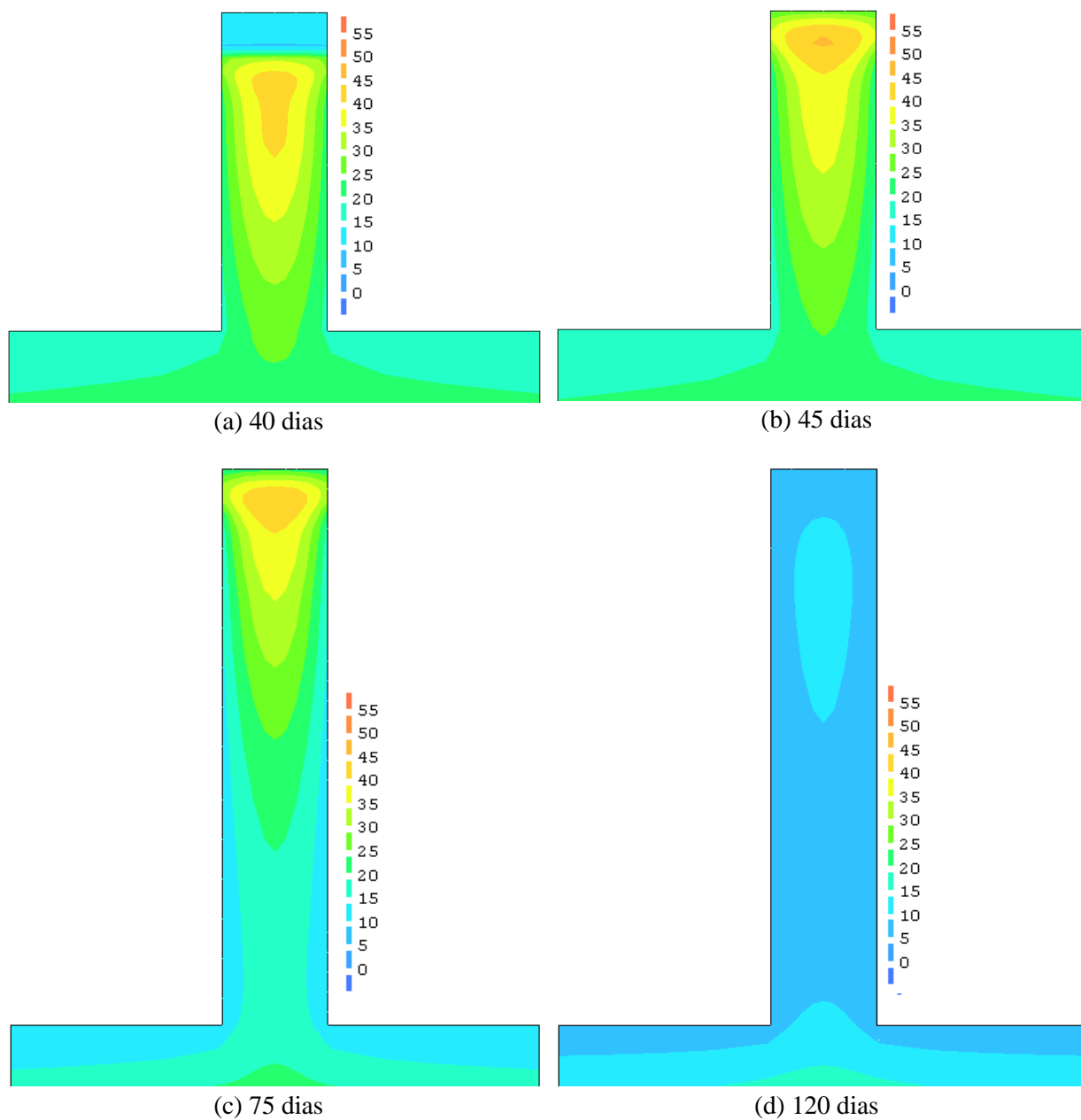


Fig.A3.5 - Mapas de variação de temperaturas: Outono

A4

MAPAS DE TENSÕES, ÍNDICE DE FENDILHAÇÃO E TEMPERATURAS: INVERNO

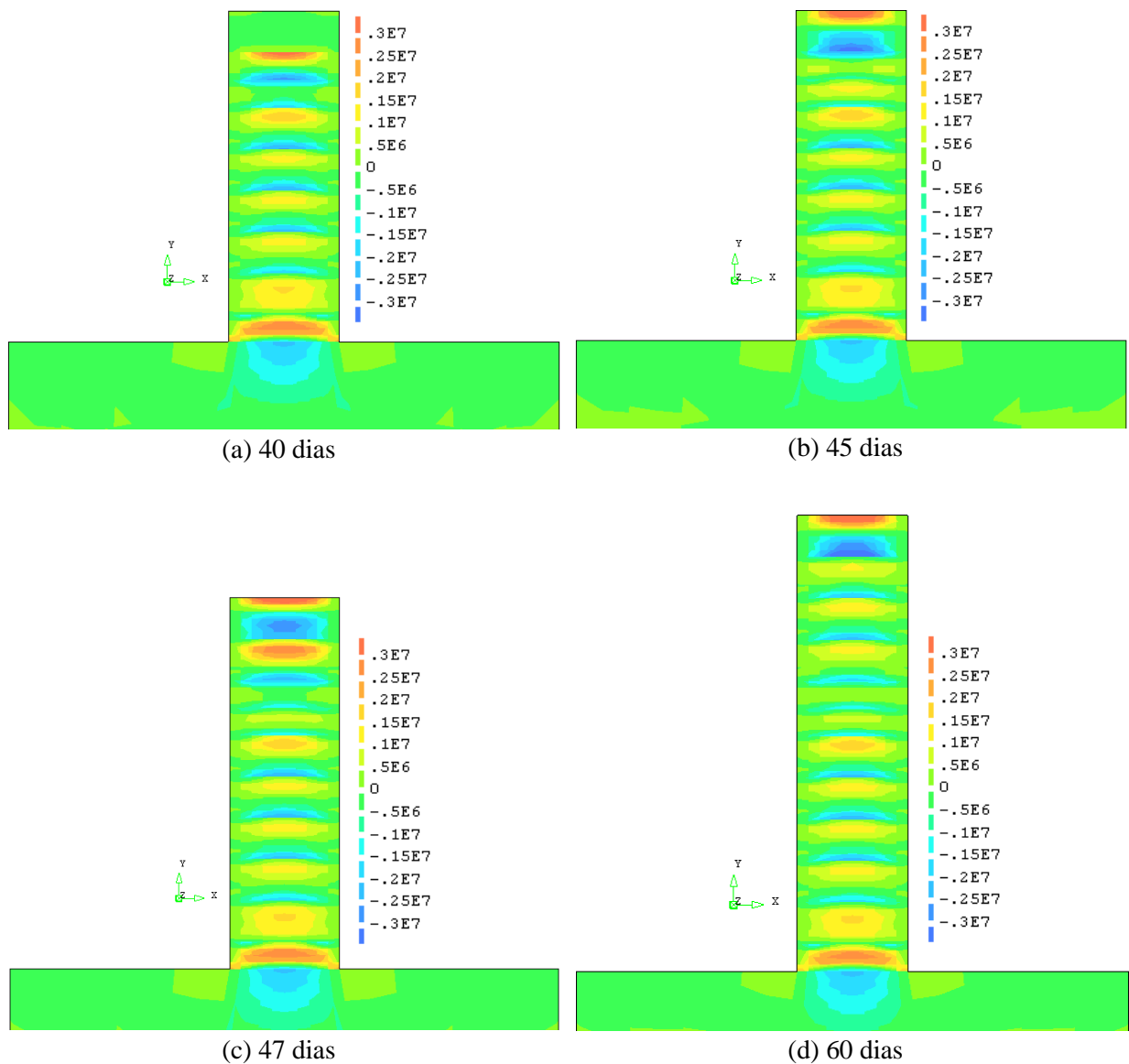


Fig.A4.1 - Mapa de tensões σ_x : Inverno

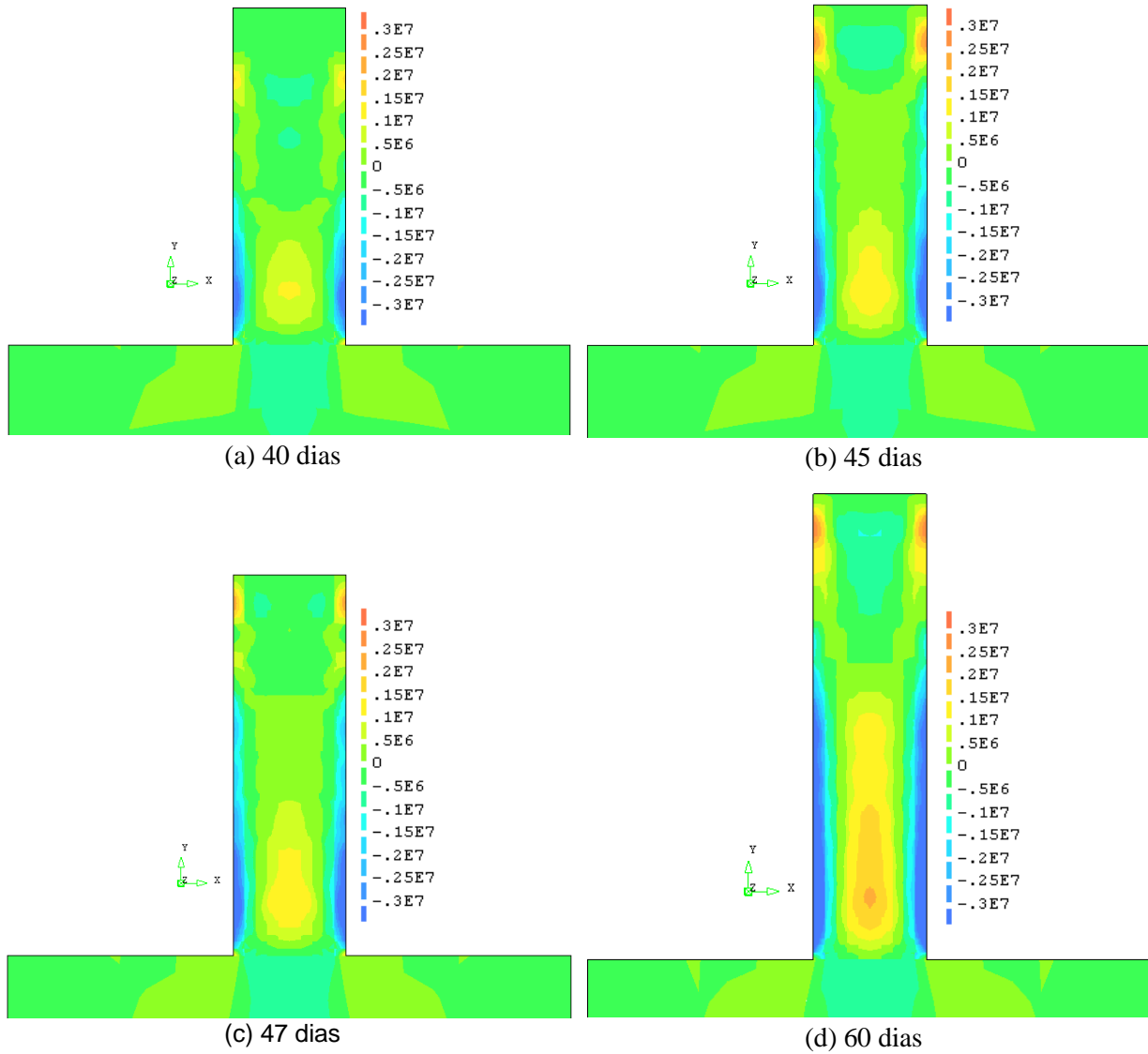


Fig.A4.2 - Mapa de tensões σ_y : Inverno

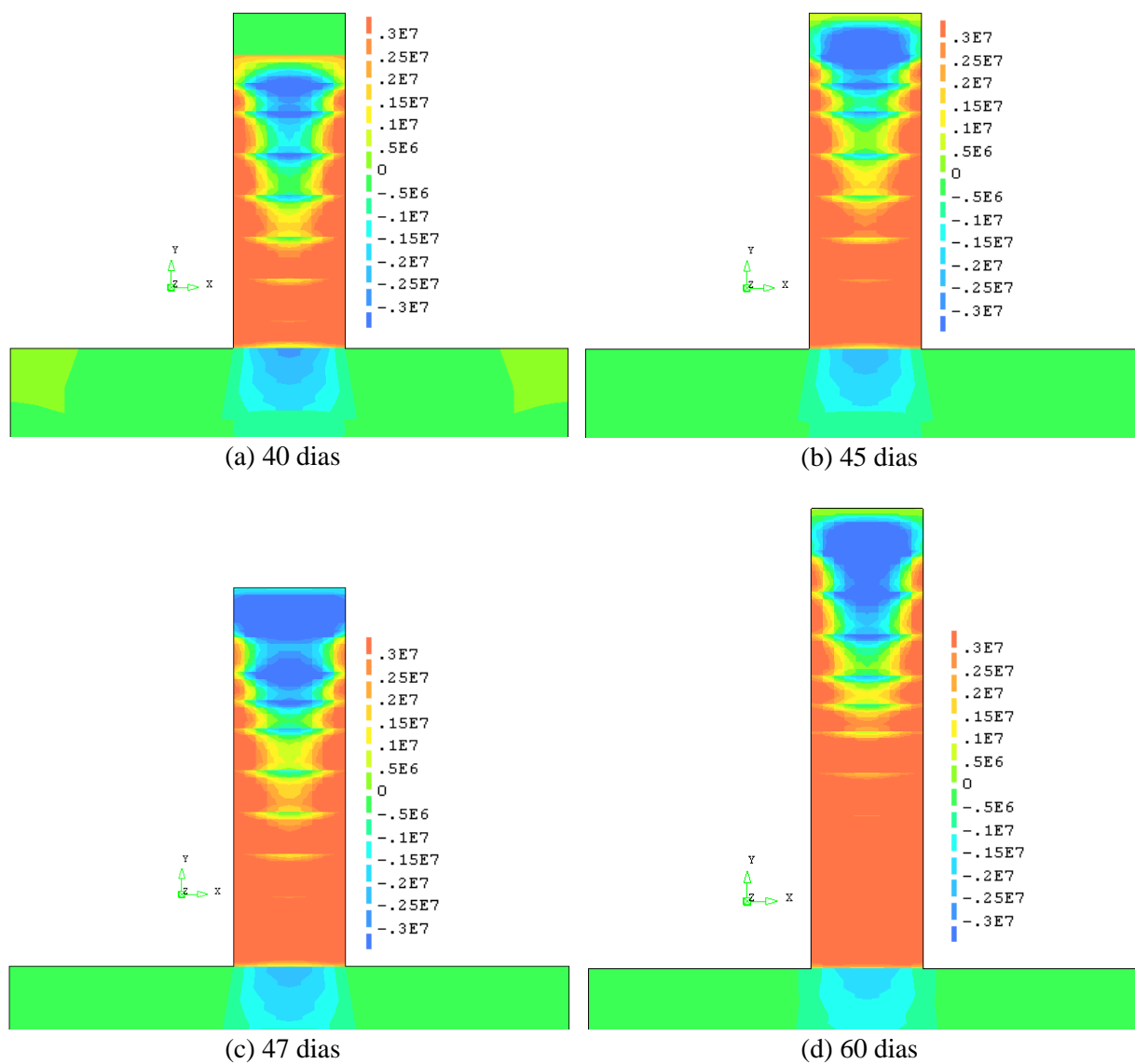


Fig.A4.3 - Mapa de tensões σ_z : Inverno

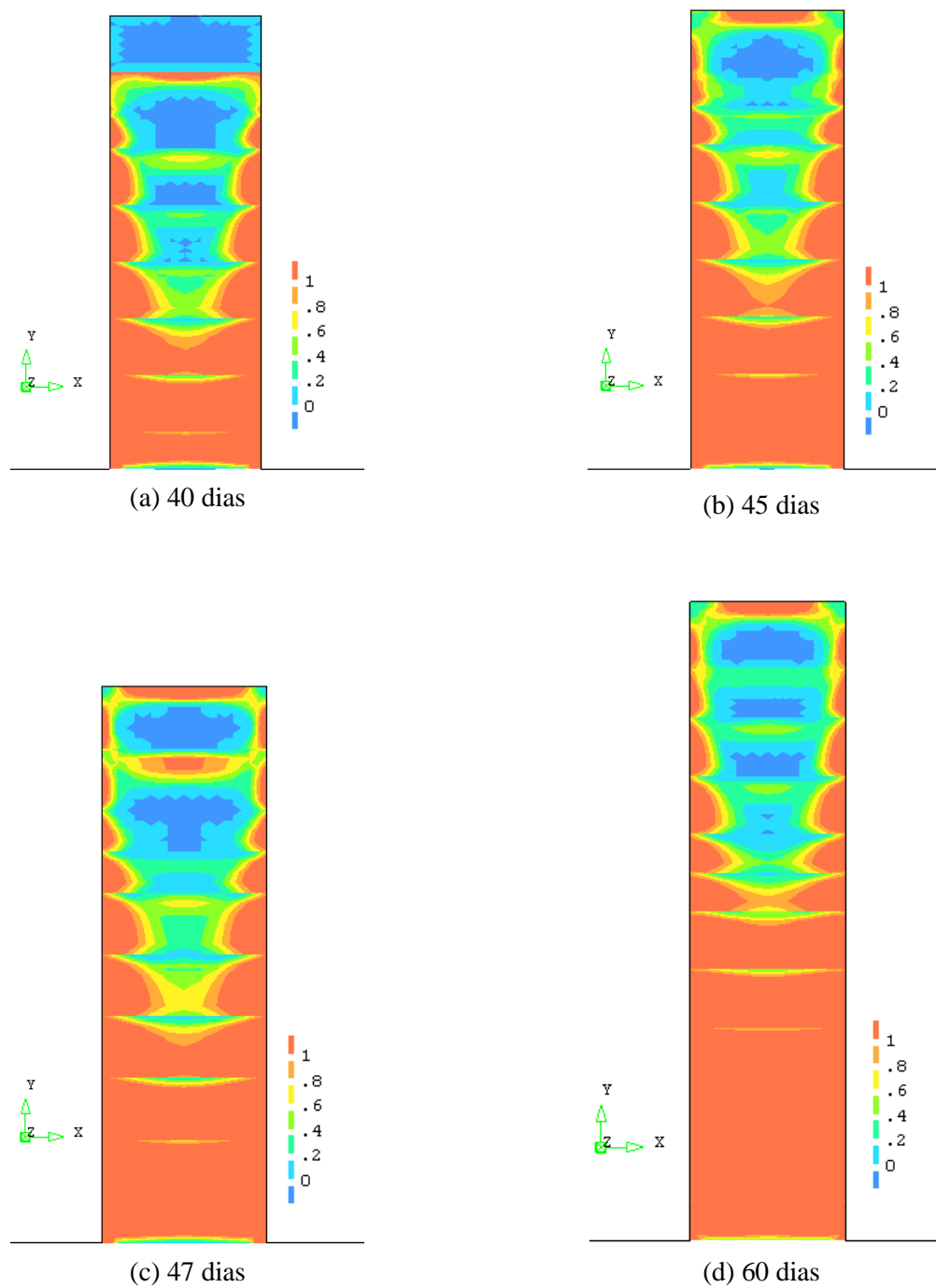


Fig.A4.4 - Mapas índice de fendilhação: Inverno

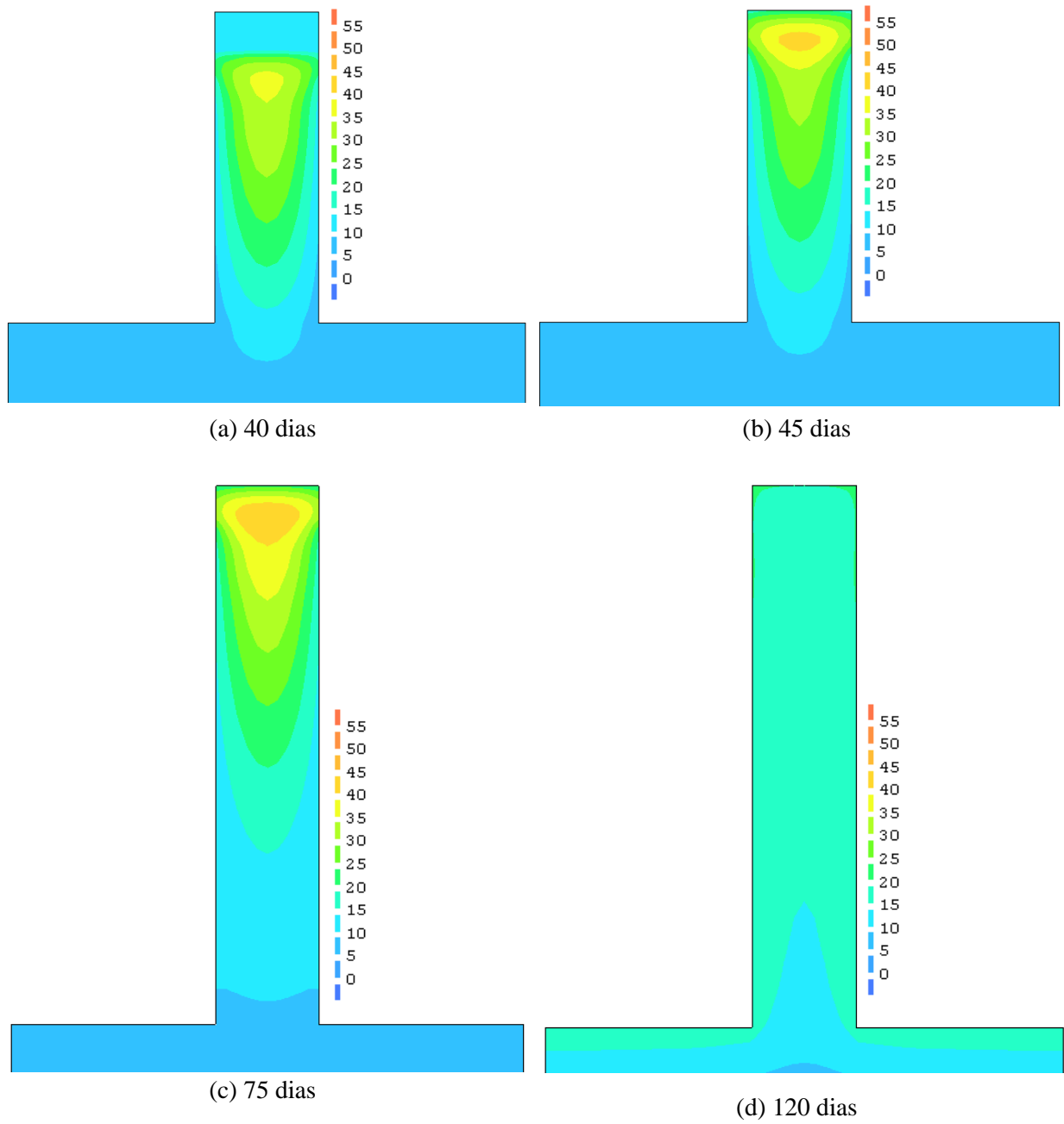


Fig.A4.5 - Mapas de variação de temperaturas: Inverno

A5

MAPAS DE TENSÕES, ÍNDICE DE FENDILHAÇÃO E TEMPERATURAS: ANÁLISE DE REFERÊNCIA COM ALTERAÇÃO DO TEOR DE CIMENTO

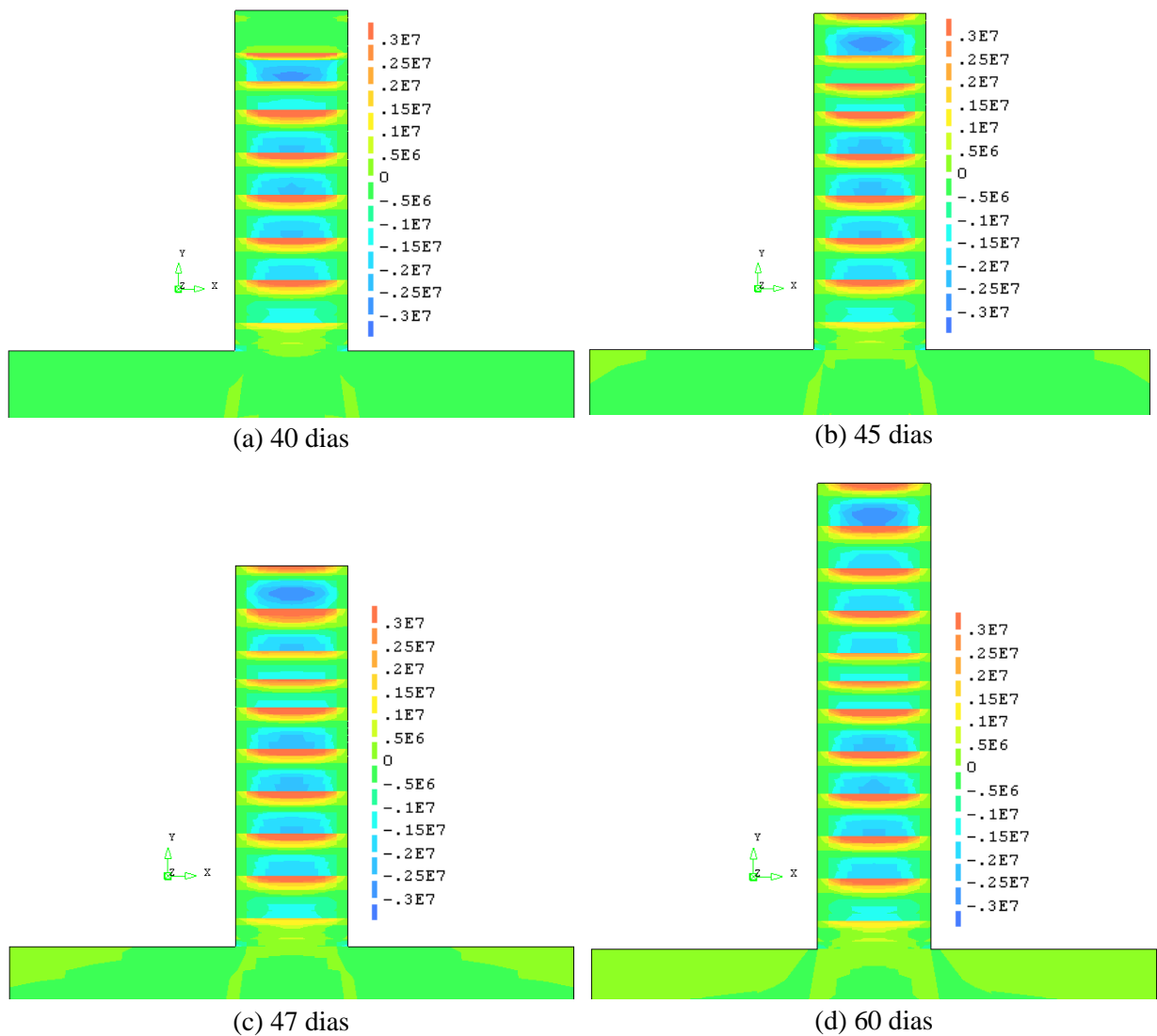


Fig.A5.1 - Mapa de tensões σ_x : Alteração do teor de cimento

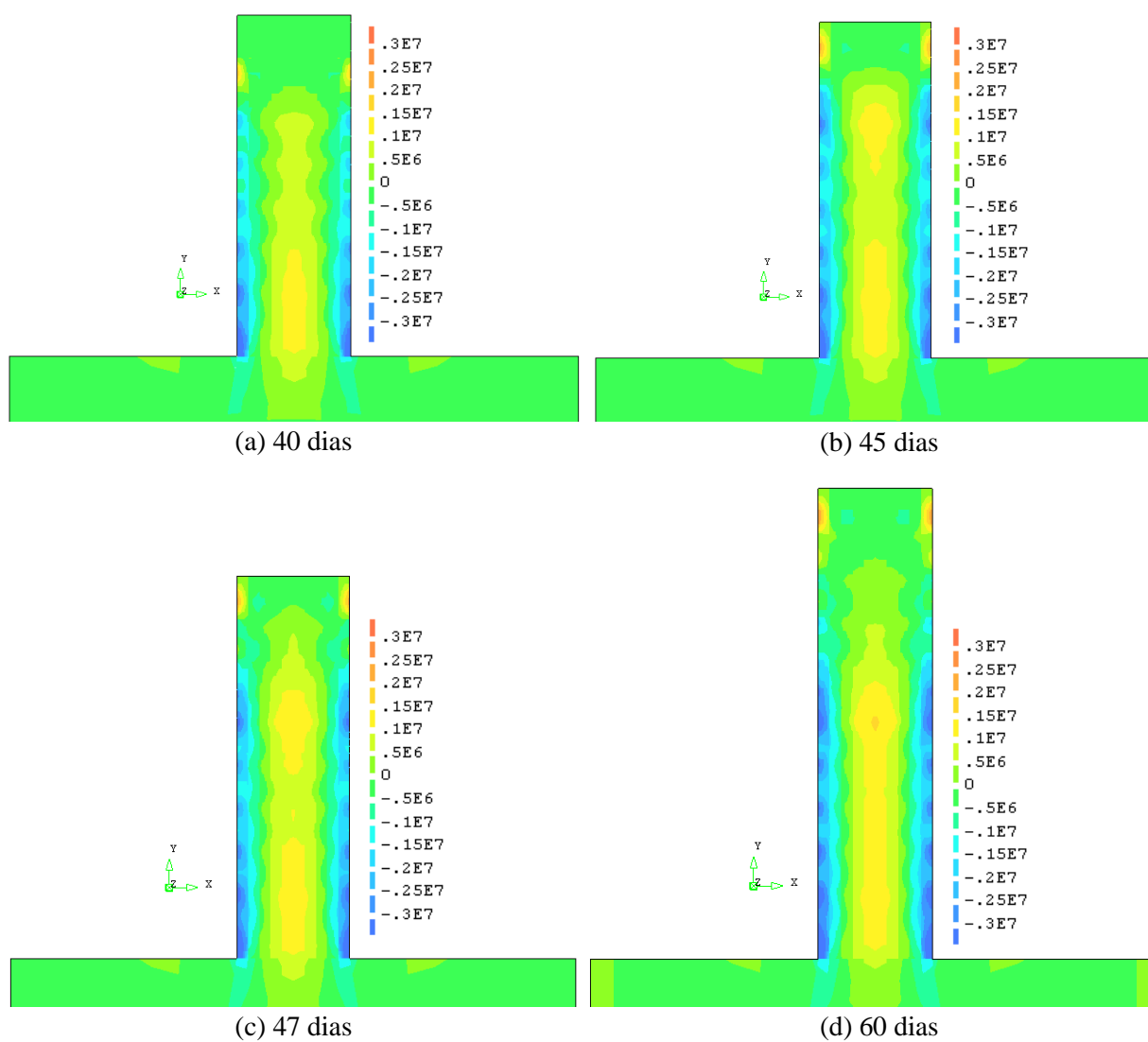


Fig.A5.2 - Mapa de tensões σ_y : Alteração do teor de cimento

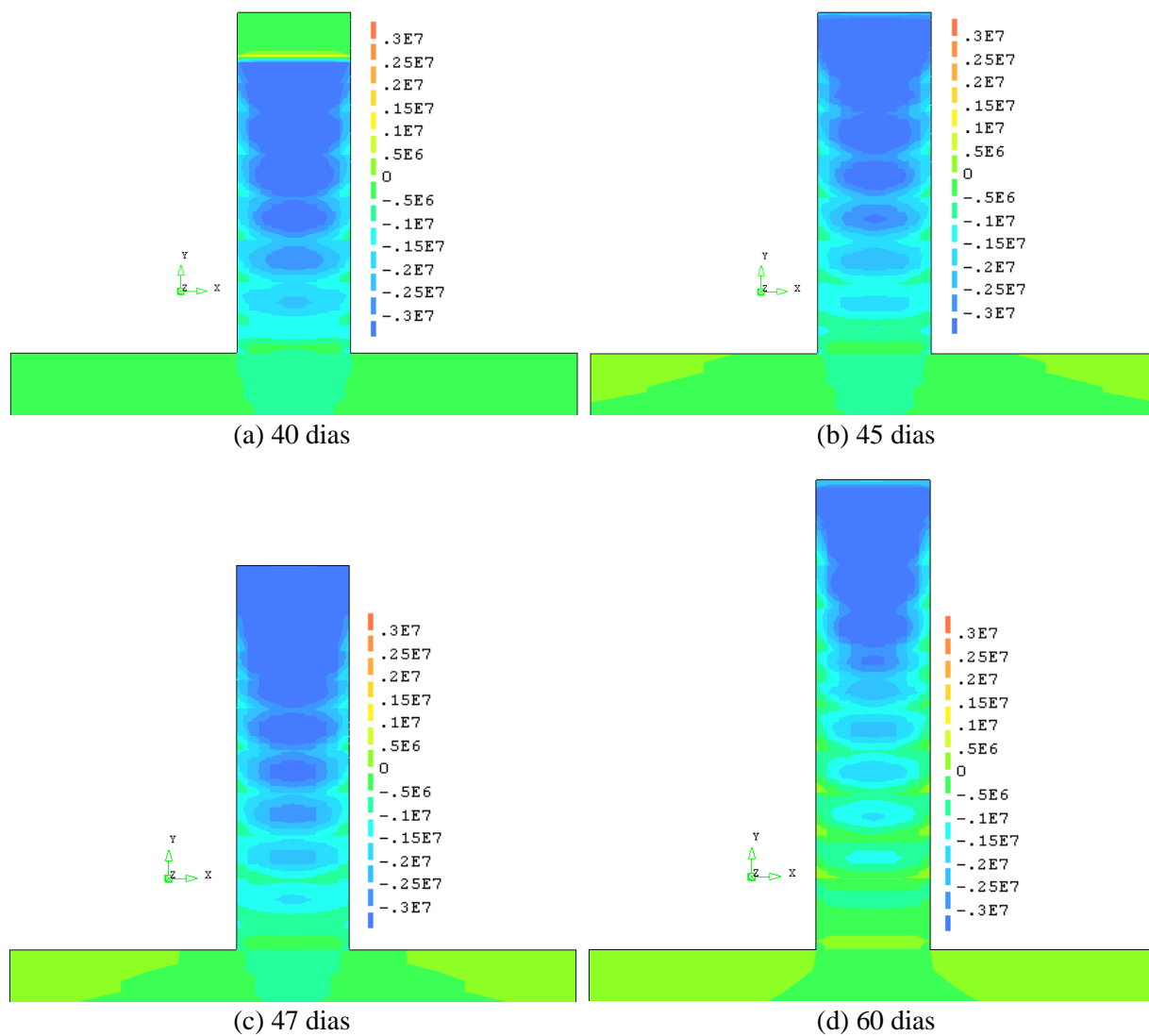


Fig.A5.3 - Mapa de tensões σ_z : Alteração do teor de cimento

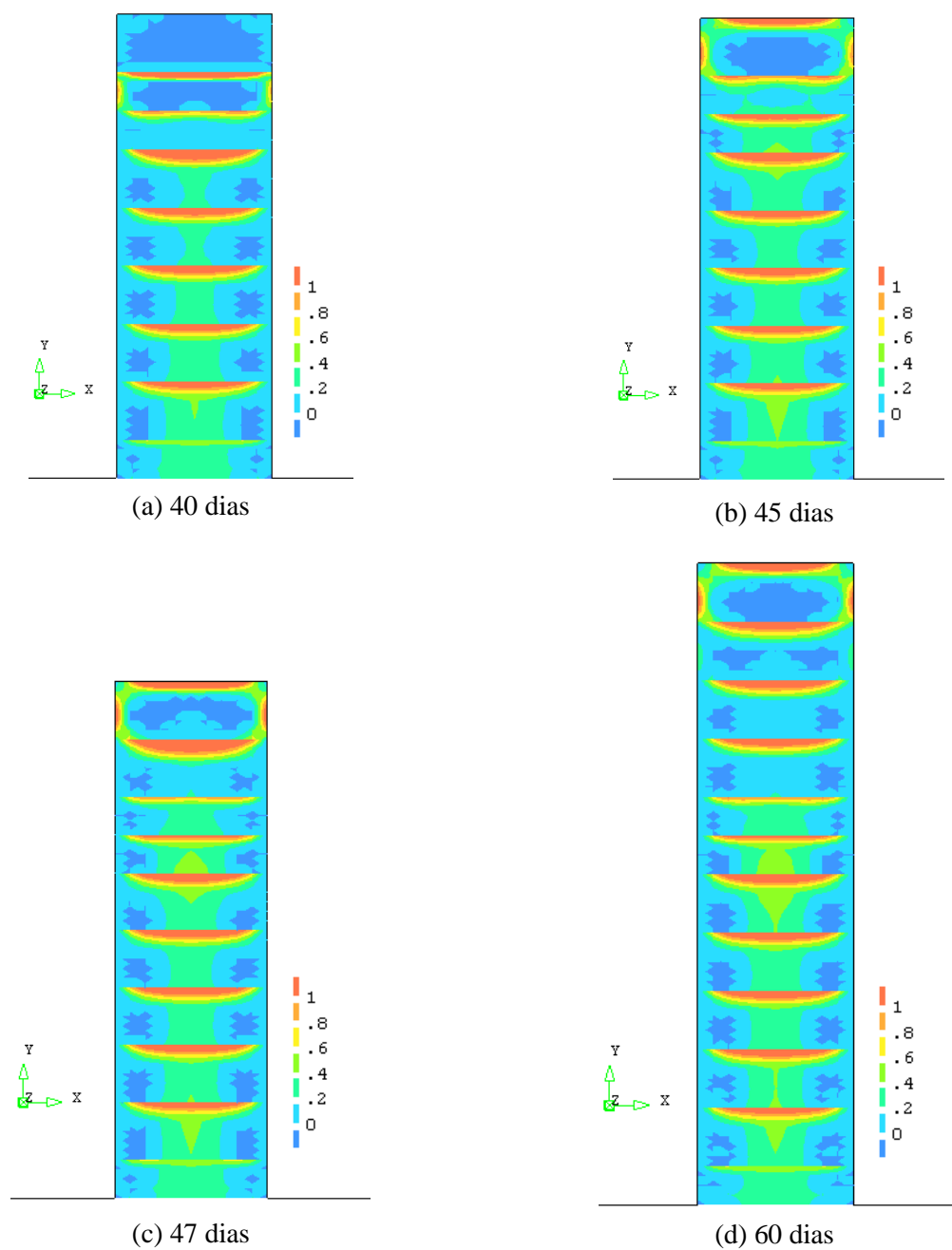


Fig.A5.4 - Mapas índice de fendilhação: Alteração do teor de cimento

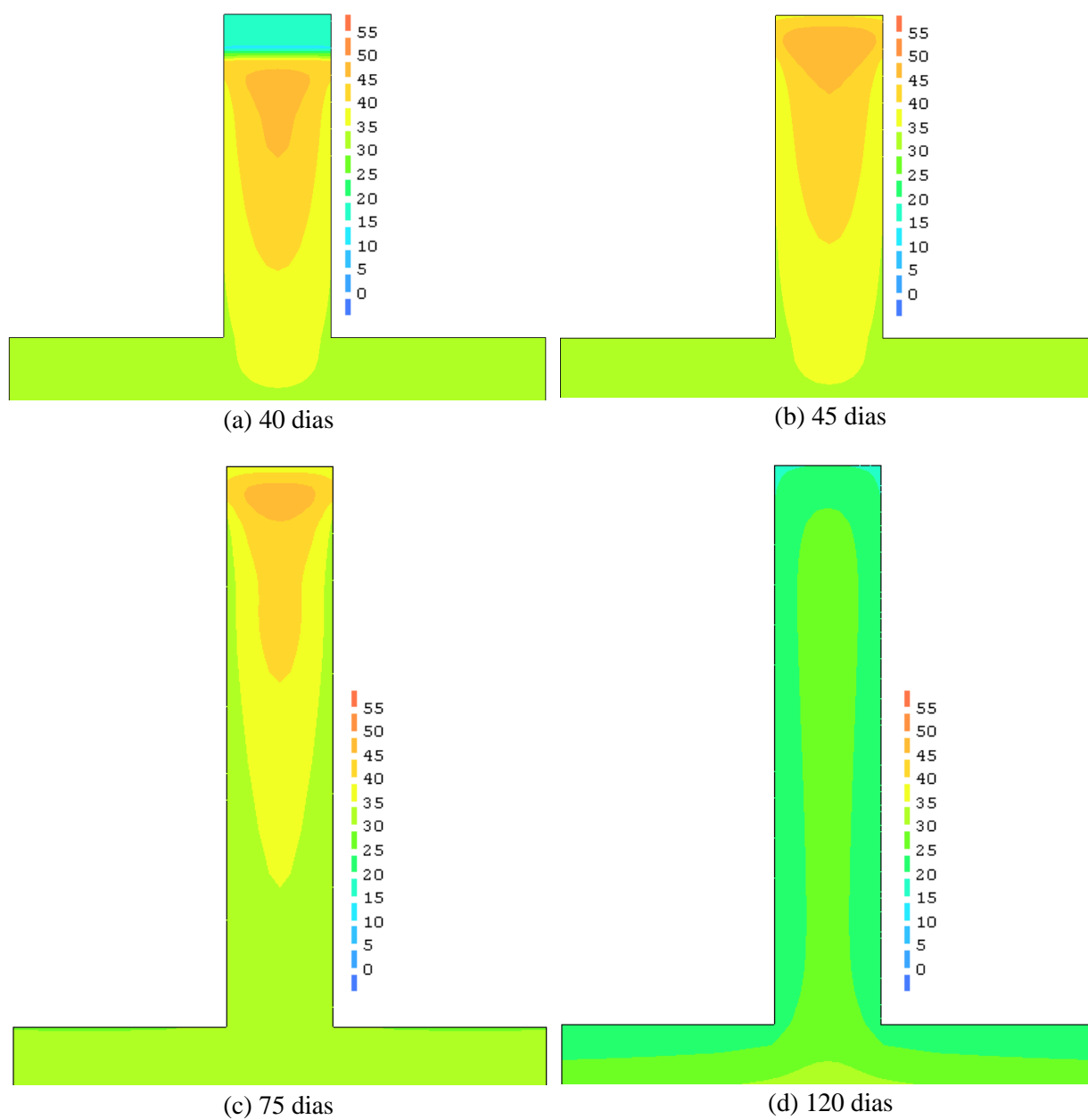


Fig.A5.5 - Mapa de variação de temperaturas: Alteração do teor de cimento

